

MOLECULAS SINTETICAS AUTORREPLICANTES

CIENCIA Y CONCIENCIA

AGRICULTURA PARA LOS PAISES EN DESARROLLO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

NACIMIENTO DE LA LUNA

SEPTIEMBRE 1994
700 PTAS.



Septiembre de 1994 Número 216

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Agricultura para los países en desarrollo*; Juan P. Campos: *El legado científico del proyecto Apolo*; Javier de Mendoza: *Moléculas sintéticas autorreplicantes*; Esteban Santiago: *Barreras a la entrada de fármacos en los tumores sólidos*; Joandomènec Ros: *Los manatíes*; Carlos Castrodeza: *Jean Henri Fabre*; Luis Bou: *¿Puede explicarse la conciencia?*, *Juegos de ordenador* y *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace...*; Shigeko Suzuki: *De cerca.*

Ciencia y sociedad:

J. P. Campos, Ana M. Rubio y Luis Bou

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Alfred T. Kamajian

Página	Fuente
5	Francesca Bray
6	Paul J. Buklarewicz
7	Joanie Popeo
8-9	Joanie Popeo (*dibujos*)
10	Johnny Johnson
11	Hiroji Motowaka/ Nature Production
12-13	NASA
14-15	Tomo Narashima
16	NASA (*izquierda*), G. Jeffrey Taylor (*derecha*)
17-18	NASA
19	Tomo Narashima (*dibujos*)
20-21	Jack Harris/Visual Logic
22-25	Jared Schneidman/JSD
26	Jared Schneidman/JSD (*arriba*), M. C. Escher, cortesía de Cordon Art B. V. (*abajo*)
39	Dana Burns-Pizer
40	Jared Schneiman/JSD (*dibujos*), Marcos Intaglietta (*fotografías*)
41	Joanne R. Less y Mitchell C. Posner (*arriba* y *abajo*)
42	Lawrence J. Nugent
43	Jared Schneidman/JSD
44	Dana Burns-Pizer
47	Roberto Osti
48	De *Historia de las Indias*, de Fernández de Oviedo (Sevilla, 1535)
49	Roberto Osti
50	Ian Worpole
51	Jeff Foott
52	Roberto Osti
53	Thomas J. O'Shea (*izquierda*), Ian Worpole (*derecha*)
54	Cortesía de L'Harmas de Fabre, Museo Nacional de Historia Natural, Francia
55	Cortesía de Georges Pasteur
56	Cathy Truc, CNRS, Marseilles (*fotografías*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
57	R. Coutin (*fotografía*), René Antoine F. de Réaumur, cortesía de Michel Emerit (*dibujos*)
58	Patricia J. Wynne
59	Jared Schneidman/JSD
62-66	Silvia Nuere
67	Javier Tejada
68-69	Silvia Nuere
70-71	James Aronovsky
72	Jason Goltz
73	Jessica Boyatt
74	Walter J. Freeman, Univ. de California, Berkeley
75	N. Hirokawa, Wiley-Liss, © 1991
76	Jonathan R. Rehg
83-86	Documents Pour la Science
88-90	Patricia J. Wynne
92	Cortesía de Claude Carré



LA PORTADA representa el proceso que, probablemente, creó la Luna: un impacto monumental. Un proyectil de mucha masa, quizá tan grande como Marte, se estrelló contra la Tierra joven hace 4500 millones de años. Los residuos pulverulentos y fundidos que se pusieron en órbita acabaron por acumularse y formar el satélite. Se trata sólo de una de las muchas ideas nuevas surgidas tras la llegada del hombre a la Luna hace ahora veinticinco años (*véase* "El legado científico del proyecto Apolo", de G. Jeffrey Taylor, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

Scientific American: «La guerra nos ha llevado a construir numerosos campos de aviación de grandes dimensiones perfectamente adaptados a las necesidades militares, pero no ha producido un sistema coordinado de aeropuertos suficiente para las auténticas necesidades de Estados Unidos. Existen actualmente 3000 aeropuertos civiles. Inmediatamente después de la guerra necesitaremos por lo menos 3000 campos más.»

«Si algún aspecto positivo ha tenido la construcción de plantas industriales impuesta por la guerra es que nos ha hecho comprender, de modo contundente, el hecho de que unas fábricas limpias, de diseño atractivo, bien ajardinadas por fuera y decoradas con gusto por dentro, compensan el leve gasto adicional y las molestias que esas mejoras ocasionan. Con ello se desarrolla el orgullo colectivo y los obreros se encuentran más a gusto.»

«Los rayos X permiten medir con precisión el espesor de las planchas de acero al rojo blanco cuando éstas emergen de los trenes de laminación a más de 35 kilómetros por hora. El doctor William D. Coolidge, vicepresidente responsable de investigación de General Electric, describe el invento como sigue: 'Los rayos X pueden emplearse como una galga que no precise de contacto físico con el material. Con un generador de rayos X debajo de la plancha y un captador de intensidad encima, es posible conseguir una indicación constante del espesor y, si queremos, hacer que los mismos rayos gobiernen el tren de modo que el espesor de la plancha se mantenga constante automáticamente.'»

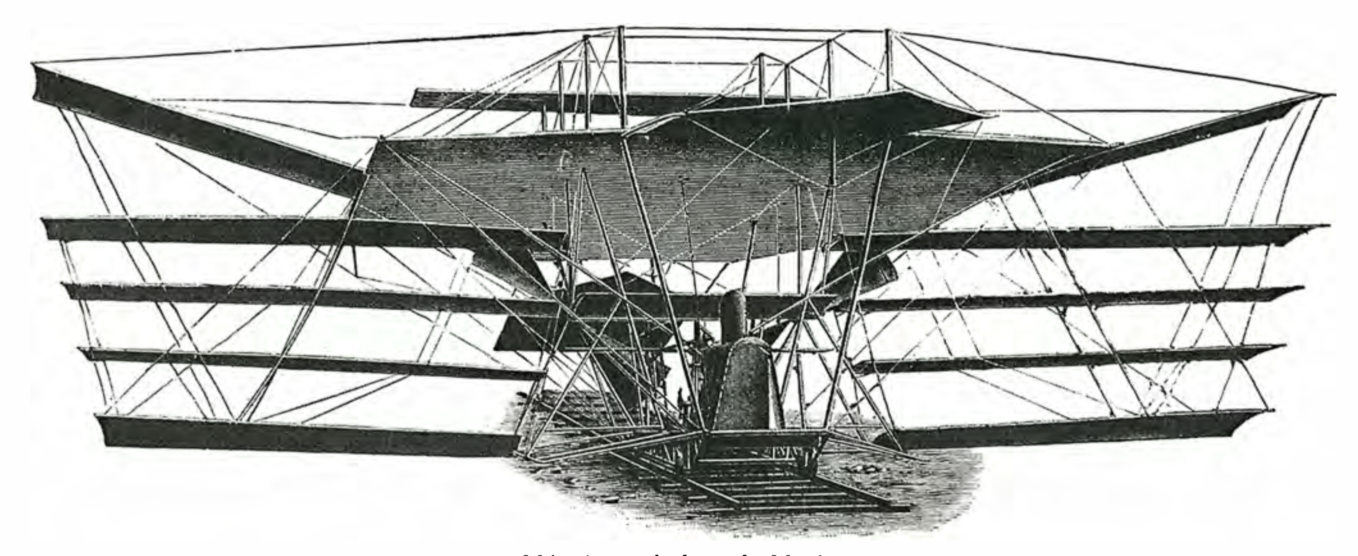
...cien años

Scientific American: «El Departamento de Guerra francés parece haberse convertido en el blanco de todos los inventores, creadores de ideas y similares. Uno de los inventos consiste en una especie de granada cautiva, que se hace estallar sobre fortificaciones, etc., y que contiene una pequeña cámara fotográfica unida a un paracaídas. Así, las fortificaciones enemigas se fotografiarían al instante, el ingenio se haría descender cual si fuera una cometa y la única operación que quedaría sería revelar las placas. Otro inventor opina que proyectiles explosivos rellenos de pimienta darían el doble resultado de cegar al enemigo y favorecer el comercio de Francia con sus colonias.»

«Como resultado de complejas investigaciones, el doctor J. S. Haldane llegó a la conclusión de que, en las explosiones en las minas, las muertes por asfixia no se deben, como generalmente se supone, al gas carbónico, sino al exceso de nitrógeno con déficit de oxígeno. Podrían salvarse vidas si los mineros pudieran ser abastecidos de oxígeno durante aproximadamente una hora. A tal efecto, ha ideado y exhibido un aparato que permite a un hombre inhalar oxígeno, que extraería, a través de un tubo dotado con válvulas reguladoras, de un depósito de medio litro que contendría 60 litros comprimidos.»

«En el terreno de la odontología los chinos se han adelantado varios siglos a los profesionales de Europa y América en lo que respecta a la implantación de dientes artificiales. Para llenar el espacio vacante en una boca utilizan un trozo tallado de fémur de buey. Luego, a través de unos orificios que abren en cada extremo del mismo, pasan alambres de cobre que fijan a las piezas dentales contiguas.»

«El martes, 31 de julio, por primera vez en la historia del mundo, una máquina voladora se separó realmente del suelo, con todo su equipo de motores, caldera, combustible, agua y una tripulación de tres personas. Su inventor, el señor Hiram Maxim, se daba cuenta con orgullo de que había realizado una hazaña que legiones de mecánicos de talento habían calificado de imposible. Por desgracia, apenas tuvo tiempo de percatarse de su triunfo antes de que la mala suerte se interpusiera para frustrar sus esperanzas. En un instante la máquina yacía en tierra como un pájaro herido, con el plumaje deshecho y las alas rotas. La causa del fracaso fue su propio éxito, ya que no sólo se elevó, sino que se arrancó de las guías instaladas para limitar su vuelo, y durante un corto instante voló libre. Pero los restos de los raíles de madera se enredaron con las velas y lo derribaron.»



Máquina voladora de Maxim

Agricultura para los países en desarrollo

El modelo occidental de agricultura muy capitalizada y supermecanizada puede no ser el adecuado para toda región en desarrollo. Quizá sean mejores los sistemas de policultivo intensivo, cuyo ejemplo más notorio es el del arroz

Francesca Bray

En los países industriales ricos la gente tiene ideas fijas sobre el desarrollo de la agricultura. Ya desde niños, en la escuela, aprenden que el progreso técnico implica el haber pasado de cavar con una estaca aguzada a hacerlo con un azadón y el haber cambiado el rudimentario arado romano de tracción animal por el multirreja de acero, arrastrado por un potente tractor. Economistas y sociólogos describen el paso de las pequeñas granjas familiares a las empresas comerciales, grandes y eficaces. La laboriosidad y las habilidades del hombre van cediendo terreno a máquinas cada vez más complicadas. Aunque en ocasiones sentimos nostalgia y añoramos las viejas maneras, estamos convencidos de que el modelo occidental marca inevitablemente la pauta del progreso humano.

Ahora bien, ¿es así? La creciente frustración de los intentos de planificar el desarrollo de la agricultura por todo el mundo ha puesto en claro que la forma en que ha evolucionado la explotación agrícola en Europa y en Norteamérica quizá no sea, a fin de cuentas, el mejor modelo para los países pobres de Africa, Asia y Latinoamérica, ni tampoco, encima, para la supervivencia de la biosfera. La idea en que se basaban la agricultura y el desarrollo económico clásicos —más es mejor para todos— está siendo ahora seriamente cuestionada.

Pero el mundo se enfrenta todavía a urgentes problemas de pobreza, hambre y enfermedad. Las poblaciones rurales son especialmente vulnerables y míseras. La gran pregunta es si unas políticas agrícolas basadas en la conservación y la sostenibilidad son capaces de resolver tan graves problemas. ¿O será el desarrollo tradicional, el guiado por el crecimiento, el único modo de mejorar los niveles de vida rurales, pese a todos sus inconvenientes? Yo voy a argüir aquí que el modelo occidental tal vez no sea el ideal para todo país en desarrollo.

Según han puesto de manifiesto los críticos de los planes de desarrollo clásicos, la producción actual de alimentos en el mundo es más que suficiente para todos sus habitantes, pero con frecuencia el desarrollo ha hecho que se agraven las injusticias distributivas. Y en realidad esta tendencia no resulta muy sorprendente si se examinan los criterios con que se define el desarrollo agrícola. La "modernización" de la agricultura, según se la suele entender, supone la aplicación de la ciencia, la tecnología y el capital al incremento exclusivo de unos pocos cultivos, cuyos productos demanda el mercado mundial, entre ellos trigo y arroz para el consumo humano, maíz y soja para piensos y algodón para la industria textil.

Este enfoque origina problemas de equidad y de conservación. En cuanto a la equidad, el sistema favorece a los agricultores ricos y pone en desventaja a los pobres. Además, la especialización y las macroeconomías reducen la diversidad económica y las oportunidades de empleo en las zonas rurales. En cuanto a la conservación, el sistema implica tres problemas: el monocultivo reduce la biodiversidad; el gran uso de combustibles fósiles y de productos químicos crea contaminación; en muchos casos, el consumo de energía iguala o incluso excede al producto de las cosechas. Y la mecanización de las labores agrícolas a gran escala acelera el desgaste del suelo y otros factores degradantes del medio ambiente.

Por estas razones, la tendencia del desarrollo agrícola de Occidente a la explotación industrial del campo ha venido a ser cada vez más criticada por los conservacionistas y también por los grupos sociales que se sienten amenazados por ella, como puedan ser los indios que se han rebelado en el estado mexicano de Chiapas o los franceses propietarios de granjas pequeñas. ¿Hay alternativas al modelo occidental o es necesario que inventemos modelos nuevos? Los ambientalistas han hallado varias tradiciones agrícolas locales que, al parecer, son sostenibles, todas ellas formas de policultivo. Todos los sistemas de agricultura fueron originariamente policultivos que proporcionaban un surtido de productos indispensables para la subsistencia. Todavía hoy, en algunas regiones mediterráneas, hay labradores que siembran trigo y cebada alrededor de sus olivos. En gran parte de la zona triguera estadounidense se solían mezclar el cultivo de cereales y la explotación de granjas. Una forma de policultivo que ha llamado hace poco la atención de los agrónomos a causa de su inherente sostenibilidad es el sistema consistente en sembrar juntos maíz, fríjol y calabaza. Estas plantas más que competir entre sí se complementan, porque sus raíces extraen nutrientes y humedad a distin-

FRANCESCA BRAY es profesora de antropología en la Universidad de California, Santa Bárbara. Licenciada en sinología y doctora en antropología social por la Universidad de Cambridge, trabajó de 1973 a 1981 en el Instituto de Investigación Needham, en Cambridge, sobre la historia de la agricultura china. De 1981 a 1983 estudió las economías del arroz asiáticas, y durante los cuatro años siguientes estuvo trabajando en el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), en París. Regresada a los EE.UU. en 1987, ha venido enseñando antropología en la Universidad de California.



1. EL CULTIVO TRADICIONAL DEL ARROZ requería mucho trabajo manual. Esta escena del trasplante en un arrozal del bello y pobre estado malasio de Kelantan fue fotografiada por la autora del artículo hace unos 20 años.

tos niveles del suelo. De hecho, las raíces del fríjol o habichuela fijan nitratos y le proporcionan así al maíz un fertilizante natural. Tan intensísima utilización de la tierra comenzó a desarrollarse hará más de 2000 años. Proporcionó el sustento a grandes civilizaciones tales como la de los mayas y sigue manteniendo a densos focos de población por toda Centroamérica.

¿Existen otros tipos de sistema agrícola que permitan un desarrollo sostenible, aunque intensivo, a escala suficiente para enfrentarse con éxito a los gravísimos problemas de pobreza rural que afligen a muchos países en desarrollo? Antes de responder a esta pregunta habrá que definir el significado de "sostenible". En mi opinión, el que un sistema agrícola sea o no sostenible no puede juzgarse simplemente por la seguridad ecológica de sus métodos de cultivo. Debe también proporcionar el mantenimiento a toda su población, así a los agricultores como a los que no lo sean. La mayoría de los pobres del mundo viven en el campo; las poblaciones rurales van todavía en aumento, y los servicios urbanos y las fábricas absorben menos mano de obra que antaño. Un sistema agrícola sostenible ha de ser capaz, por consiguiente, tanto de crear empleo como de proporcionar alimentos. Deberá ser flexible y diversificado, apto no sólo para permitir la subsistencia sino también para producir excedentes comercializables, y habrá de mantener dentro del mismo ámbito rural un intercambio de bienes y servicios en vez de depender demasiado del mundo exterior para sus aprovisionamientos y mercados.

Mi tesis es que planear el desarrollo orientándolo hacia economías rurales sostenibles nos resultará más fácil si tomamos por modelo no los sistemas agrícolas de Occidente, que tienden de suyo al monocultivo y a lo macroeconómico, sino sistemas de policultivo que aprovechan mejor la tierra y ofrecen una base para la diversificación económica. Algunos alimentos básicos se prestan más que otros al policultivo intensivo. En este artículo me referiré exclusivamente al laboreo del arroz tal como se practica en el este de Asia, porque su registro histórico es lo bastante rico como para que sirva de muestra de una ininterrumpida evolución técnica y económica.

Sin embargo, no pretendo sugerir que los problemas del mundo vayan a resolverse si todos los países se pasan al cultivo del arroz. Resulta válida casi cualquier combinación de cultivos de alimentos básicos que aprovechen a fondo la tierra.

La concepción que Occidente ha impuesto al resto del mundo de progreso agrícola "correcto" tiene sus raíces históricas en el desarrollo de la agricultura por el noroeste de Europa y por las zonas cerealistas del Nuevo Mundo, es decir, las regiones que alimentaban a los centros urbanos de la revolución industrial. Pero esta dinámica, en la que el empleo es un recurso escaso y la producción se

incrementa sustituyendo mano de obra y animales por innovaciones técnicas, no es inevitable; se aplica a las condiciones de producción específicas de aquellas regiones.

En la Europa del norte, donde evolucionó el sistema de los cultivos de secano, la estación de crecimiento de las plantas es corta. Los cereales básicos —trigo, cebada y centeno— tienen espigas, o panículas, con relativamente pocos granos, a lo sumo unas docenas, si se los compara con los 100 o más granos de una panícula de arroz o de mijo. Cada planta suele tener no más de tres o cuatro tallos o vástagos. En principio, una semilla podría producir unos 200 frutos, pero la parábola evangélica nos recuerda que muchas semillas se malograron donde cayeron. A los labradores de la Europa medieval les era preciso guardar para la siembra del año siguiente nada menos que una tercera parte del grano cosechado, y otra gran porción del mismo la necesitaban para alimentar durante el invierno a los animales de carga. Como el único abono disponible era el estiércol, la tierra debía dejarse a menudo en barbecho y sólo podía sembrarse con cereal una vez cada dos o tres años. En resumen, este sistema de agricultura usaba la tierra en extensión y no podía sustentar a poblaciones muy densas. En la Inglaterra del siglo XI, la finca típica, según lo registra el Gran Catastro, era de 30 acres (12 hectáreas).

Los animales de carga desempeñaban un papel importantísimo en este sistema de agricultura. Los rendimientos eran tan bajos que resultaba imposible labrar la tierra necesaria para subsistir con sólo el esfuerzo humano. Para tirar del arado algunos labriegos sólo contaban con una o dos yuntas de bueyes, pero en los pesados terrenos calcáreos típicos de la Europa nórdica, en los que para remover la tierra había que hundir mucho la reja, el tiro podía tener que estar formado hasta por una docena de bueyes. En tales condiciones, está claro que las grandes fincas, que pueden sustentar a más animales, contar con más equipo y organizar con más eficacia su uso, tendrán notable ventaja sobre las fincas menores.

Los mercados urbanos de productos alimenticios fueron en aumento durante los siglos XII y XIII, y los viejos sistemas feudales, en los que los siervos de la gleba labraban sus propias porciones de terreno y las del dominio señorial, empezaron a caer en desuso. Comenzaron a consolidarse las casas solariegas, que poseían grandes fincas y las labraban con trabajadores asalariados. Cuando los terratenientes ponían sus campos en arriendo, no se los arrendaban a propietarios modestos que los labrasen para susbsistir, sino a labradores pudientes, pequeños capitalistas como los *yeomen* (granjeros) ingleses, capaces de afrontar los riesgos de la inversión en animales y equipo. En la agricultura de muchas partes de la Europa noroccidental se habían formado relaciones capitalistas antes del siglo XV. Los mercados de fincas y de mano de obra estaban bastante desarrollados. Estaban presentes, pues, las relaciones sociales necesarias para la fundación de una moderna agricultura mecanizada, pero faltaba aún la necesaria pericia técnica.

El desarrollo de este tipo de agricultura estuvo impulsado por los mejores resultados obtenidos por las grandes unidades de producción centralmente dirigidas. El siglo XVIII registró mejoras, entre las que se incluyeron nuevas variedades de granos y de animales de cría, perfeccionamientos en arados y sistemas de drenaje, y cultivos rotativos en los que se combinaban las cosechas de cereales con las de forrajes, como la alfalfa, la esparceta y los nabos. Todos los especialistas concuerdan en que sólo las fincas grandes eran aptas para estos métodos de "explotación agrícola de altura". Los niveles económicos dictaban quiénes podían beneficiarse de tales mejoras.

Antes de la mecanización, muchas innovaciones de la agricultura a gran escala requerían aumentos tanto de mano de obra como de capital. En el noroeste de Europa, los agricultores tenían que competir con la industria, nueva y pujante, para conseguir obreros; en el todavía poco poblado Nuevo Mundo, la mano de obra era simplemente muy escasa. Los inventores llevaban dándole vueltas a la maquinaria agrícola desde el siglo XVI, aunque sin mucho éxito. A principios del siglo XIX la necesidad de maquinaria agrícola se dejaba sentir claramente.

Por aquella época los ingenieros podían recurrir por fin a materiales y



2. UN CULTIVO COMPLEMENTARIO de *kabocha* (especie de calabaza japonesa) crece sobre el murete que rodea un campo de arroz japonés. Este gran aprovechamiento de la tierra es característico de la agricultura del este de Asia.

técnicas procedentes de la esfera industrial —el acero, la fuerza del vapor y los productos químicos— para desarrollar sustitutos de la mano de obra en pro de la agricultura. Las primeras trilladoras mecánicas que tuvieron éxito aparecieron en el mercado británico en los años 1830 (provocando disturbios entre los trabajadores del campo, que veían amenazados sus precarios medios de ganarse la vida). Siguiéronse las segadoras, cosechadoras y sembradoras de tracción animal, y luego, ya en el siglo XX, el tractor reemplazó al caballo. Los fertilizantes químicos eliminaron la necesidad de cultivos rotativos y facilitaron el monocultivo. Después, los herbicidas y plaguicidas redujeron todavía más la necesidad de mano de obra. El promedio de extensión de tierra cultivable por obrero agrícola es hoy, en los EE.UU., de 137 hectáreas, y una finca de tamaño medio, del tipo de las que suelen estar a cargo de una sola familia, tiene de 20 a 100 hectáreas.

Este es el sustrato histórico del que se deriva nuestra idea de progreso agrícola "normal". Del mismo modo que las pautas occidentales de industrialización pasaron de una nación a otra, definiendo nuestro concepto de lo que es una economía moderna, así también, después de la Segunda Guerra Mundial, las características de la revolución agrícola occidental determinaron el programa de la modernización agrícola mundial.

Las nuevas técnicas que desarrollaron dieron al principio unos resultados tan impresionantes que no tardaron en recibir el nombre de la revolución verde. Toda ella se centra en el uso de variedades de trigo, maíz y arroz muy productivas. Estas variedades son híbridos que los agricultores no pueden criar por sus propios medios y que para crecer necesitan fertilizantes y herbicidas químicos. En granjas experimentales esos híbridos produjeron unas cosechas tan enormes que pronto se los llamó semillas milagrosas. Sin embargo, como observa el economista indio Vandana Shiva, las comparaciones que se hacen entre las variedades viejas y nuevas sólo tienen en cuenta el resultado de ese cultivo único, no el de todo el sistema de cultivo mixto al que aquél con frecuencia desplaza, de modo que la ganancia global puede que sea mucho menor de lo que se pretende.

Por tal insistencia en el monocultivo, los organismos oficiales que proporcionan a los agricultores la información técnica, las simientes y los créditos suelen abogar por el cultivo a gran escala y por una concentración parcelaria que haga posible la mecanización del campo. En estas condiciones, los excedentes vendibles y los márgenes de beneficio (aunque no necesariamente los rendimientos) son generalmente proporcionales al tamaño de la finca, y las fincas pequeñas pierden su viabilidad.

La meta primordial que se proponían alcanzar las políticas de la revolución verde de los años 1960 y 1970 era la erradicación del hambre en el mundo entero: modernizando los sistemas agrícolas poco productivos aumentaría la producción mundial de los cereales básicos. En este aspecto, la revolución verde ha sido un gran éxito. La producción mundial de los principales cereales básicos (trigo, maíz y arroz) sería hoy más que suficiente para alimentar a toda la población del planeta, si no fuese por los problemas de la mala distribución.

Pero a medida que los agricultores se han concentrado en el monocultivo, se han vuelto más vulnerables frente a las plagas y a las fluctuaciones de los precios. La variedad de las dietas locales se ha reducido drásticamente, al igual que las posibilidades de empleo. Las nuevas técnicas usan enormes cantidades de sustancias químicas y de carburantes fósiles. En términos energéticos, son menos eficientes que muchos sistemas agrícolas tradiciona-

Productividad agrícola

Las estimaciones económicas de la productividad agrícola no suelen tomar en cuenta más que la cantidad obtenida de una planta determinada por unidad de superficie y pasan por alto otros usos que de la tierra puedan hacerse. Mostramos aquí el resultado de tal estimación comparando un policultivo (cultivo de diferentes productos en una misma hectárea de terreno) con un monocultivo de arroz (una variedad enana muy productiva, de empleo habitual en la agricultura de la revolución verde).

En el primer caso (*arriba*), una misma hectárea de terreno se usa el mismo año para varios cultivos diferentes y produce, como cosecha principal, 1,1 toneladas de un cereal (arroz) y 1,6 toneladas de paja, que sirve de pienso y de combustible, pero produce además, como cosechas secundarias, diversas cantidades de plantas oleaginosas, leguminosas y de fibra. El monocultivo (*abajo*) produce cuatro toneladas de arroz y dos de paja. Si se aplica a un solo producto, la comparación es contraria al policultivo: 1,1 toneladas de grano por hectárea frente a cuatro.

POLICULTIVO TRADICIONAL



PLANTAS OLEAGINOSAS




FRIJOLES Y OTRAS LEGUMBRES



PLANTAS TEXTILES

CEREALES
GRANO = 1,1 TONELADAS
PAJA = 1,6 TONELADAS



MONOCULTIVO DE LA REVOLUCION VERDE



VARIEDADES DE CEREALES ENANOS MUY PRODUCTIVAS

GRANO = 4 TONELADAS






PAJA = 2 TONELADAS




les. El monocultivo, el arado mecánico, el ampliar labrantíos talando bosques y suprimiendo pastizales, y el continuo uso de productos químicos, todo ello contribuye a la degradación del medio ambiente.

El segundo objetivo de la revolución verde era generar prosperidad rural mediante la producción de excedentes vendibles. Parecía obvio que la aplicación de conocimientos científicos y de capital daría por resultado unas prácticas agrícolas más eficaces y productivas. Las teorías en boga por entonces reconocían que las exigencias de capital que tiene este tipo de modernización favorecerían incialmente a los agricultores más ricos, pero suponían que los beneficios no tardarían mucho en redundar en provecho de toda la población.

De hecho, muchas regiones han experimentado una grave polarización económica. Los agricultores ricos han aumentado sus propiedades, mientras que los pobres han ido perdiendo las suyas hasta convertirse en fuerza de trabajo asalariada y dependiente. Quienes pueden trabajar en la agricultura dependen cada vez más de la economía urbana en lo tocante a los bienes y servicios y al mercado. Las oportunidades de trabajar en el campo disminuyen, pero la industria urbana no puede generar empleo suficiente y los parados se apiñan en los barrios bajos de las ciudades.

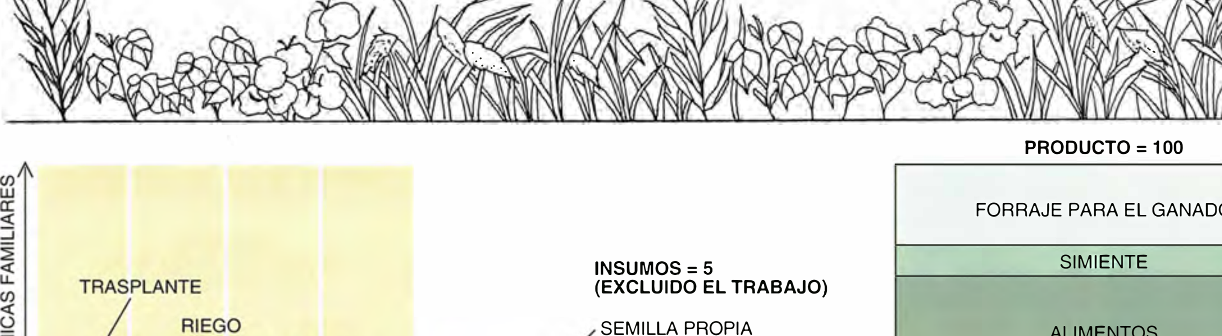
Si se consideran las condiciones de la producción y las consecuencias del desarrollo, se echa de ver que el modelo japonés (o, mejor dicho, asiático-oriental), centrado en la producción de arroz, difiere radicalmente del modelo de cultivos de secano del norte de Europa. En China, Japón, Vietnam y Corea, el uso de la tierra se intensificó a lo largo de los siglos por la creciente disponibilidad de mano de obra especializada. Allí eran pocas las economías de escala, predominaban los pequeños propietarios y las pautas de cultivo intensivo sostenían un sistema de agricultura mixta y una economía rural muy diversificada que podía proporcionar medios de vida a grandes poblaciones.

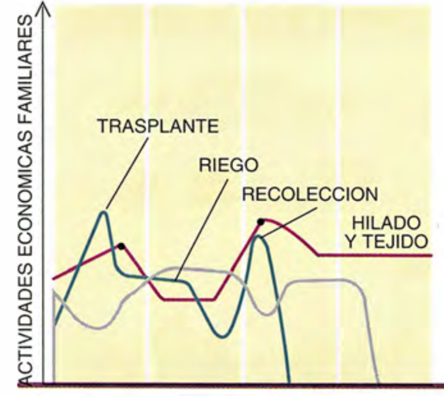
El agua es un factor crucial en cómo se produjo el desarrollo del cultivo del arroz. Es cosecha de zonas monzónicas, pues aunque puede germinar también en secano, el agua es su medio natural. El arroz cultivado más antiguo que se ha hallado hasta la fecha lo ha sido en un yacimiento chino neolítico próximo a Shangai, al borde de un pantano poco profundo, y se le data en unos 5000 años a.J.C. Otros yacimientos arcaicos diseminados por el sureste del continente asiático están también junto a pantanos u otras masas de agua naturales.

Un buen arrozal es aquel en que la provisión de agua puede regularse, drenándolo según convenga. De ahí que los de Oriente sean ordinariamente muy pequeños, si se los mide por el patrón occidental; en China un campo de arroz de 20 metros cuadrados suele considerarse grande. Los plantones del arroz han de hundirse en un suelo húmedo, pero se pudren en el agua estancada; cuando son ya como de un pie de altura, gustan de tener sobre sí varios centímetros de agua durante todo el período de florecimiento y maduración, tras de lo cual hay que drenar el campo varios días antes de proceder a la recolección.

Es fácil embalsar el agua de lluvia rodeando un campo con muretes de tierra apisonada en forma de pequeños diques, pero puede que se evapore antes de que el arroz crezca del todo. Por eso en algunas regiones los arroceros adoptaron muy pronto sistemas de irrigación con agua de lluvia recogida en tanques o cisternas. Otras modalidades de riego incluyen la canalización de arroyuelos que recorran terrazas escalonadas en las faldas de las colinas y la construcción de canales por los que des-

POLICULTIVO TRADICIONAL BASADO EN EL ARROZ (SURESTE DE CHINA EN EL SIGLO XVI)





INSUMOS = 5
(EXCLUIDO EL TRABAJO)
SEMILLA PROPIA
UTILLAJE (APEROS SENCILLOS)
ABONO PROPIO
ABONO COMPRADO (FIBRA VEGETAL, ESTIERCOL)
TRABAJO DE LA FAMILIA



3. LOS FACTORES DE PRODUCCION y los resultados obtenidos en un policultivo tradicional arrocero al sureste de China en el siglo XVI se comparan con un monocultivo moderno realizado en

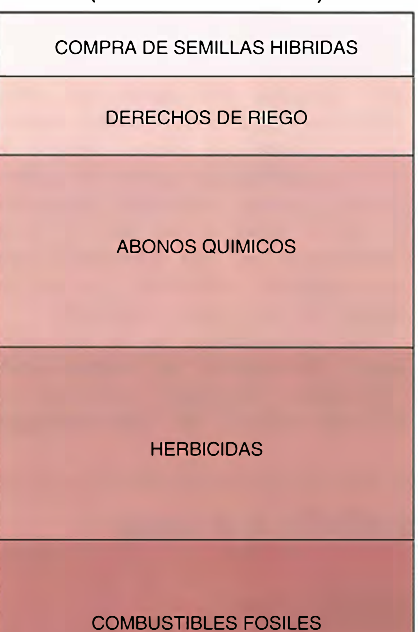
viar aguas de grandes ríos, en cuyo caso se suele tener que bombear el agua para que llegue a los campos más altos. Todas estas formas eran comunes en la China y el Japón de los tiempos medievales, y permitieron que el cultivo del arroz se extendiera desde los pequeños valles fluviales por las laderas de los montes, hacia arriba, y por las pantanosas planicies de los deltas, hacia abajo. La construcción de diques, redes de irrigación, cisternas o campos terraplenados requiere grandes inversiones iniciales en mano de obra, pero después su mantenimiento es relativamente barato y fácil. Así que no es de extrañar que los cultivadores de arroz hayan solido preferir intensificar su producción en los campos ya existentes antes que ampliar el área de cultivo.

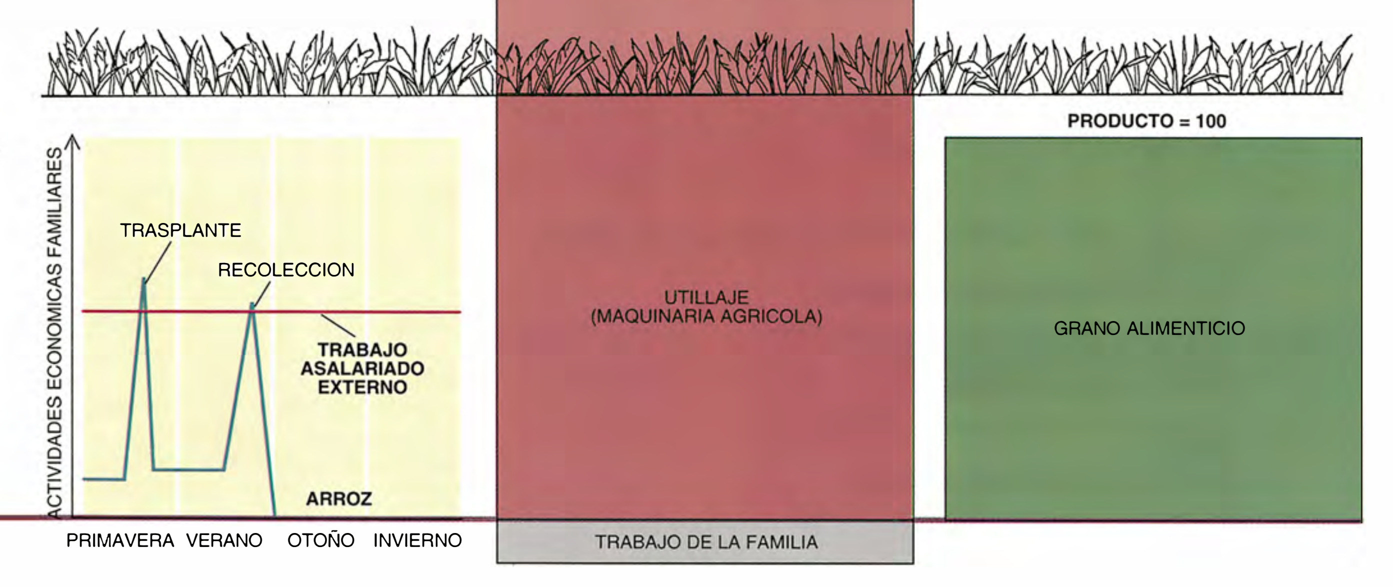
El agua aumenta la viabilidad de los sistemas arroceros. A diferencia de los terrenos de secano, los arrozales más que perder fertilidad la ganan con el transcurso de los años. Sean cuales fueren la estructura y la fertilidad originarias de un suelo, al cabo de varios años de incesante cultivo del arroz, los centímetros superiores de ese suelo se transforman en un fino cieno grisáceo de escasa acidez bajo el cual hay una dura capa detrítica que retiene la humedad. Los organismos fijadores del nitrógeno, que abundan por lo general en el agua, sirven de abono. Las variedades de arroz tradicionales suelen responder bien a los fertilizantes orgánicos; las cáscaras de lima y de soja fueron muy usadas en China y Japón allá por el siglo XVII, obteniéndose hasta seis toneladas anuales por hectárea en algunas zonas de doble cosecha.

Las plantas del arroz tienen varios tallos portadores de semillas y la cabeza de cada semilla contiene por término medio unos 100 granos. La técnica de trasplantar los plantones del arroz aumenta este promedio. Se labra con meticulosidad una pequeña parcela de tierra fértil, se abona y se siembra con simiente escogida y que ya ha empezado a germinar. Entre tanto, se empapa, se ara y se grada el campo principal hasta crear una ligera capa de sedoso cieno. Pasado aproximadamente un mes, se arrancan los plantones, se desechan los enfermizos y se quita la parte superior de las hojas de los sanos, replantándolos en la encharcada tierra del campo principal.

Este procedimiento requiere mucho trabajo, pero permite seleccionar con esmero las plantas sanas y usar eficazmente pequeñas cantidades de abono. Además la planta responde al proceso de trasplante echando más tallos. Tras esta operación, los plantones ya sólo necesitan estar unas pocas semanas en el campo, por lo que puede utilizarse la tierra para otros cultivos.

El cultivo del arroz puede aumentar mucho el aprovechamiento del terreno. Aunque los estanques, canales y muretes lleguen a ocupar una quinta parte del mismo, no se desperdicia ningún espacio: hay peces que mordisquean la hierba en los estanques o se comen los caracoles en los arrozales, y patos que se alimentan de peces. Los muretes estrechos sirven para cultivar verduras y en los más anchos se pueden plantar moreras para





Japón con las técnicas de la "revolución verde". La altura de las barras etiquetadas representa la correspondiente cantidad de factor utilizado y de producto obtenido. Las curvas de la parte izquierda de cada diagrama indican cómo distribuyeron su tiempo productivo los trabajadores de la granja. En los sistemas de policultivo las mujeres trabajan poco en los campos, pero se ocupan a fondo en menesteres tales como la producción de seda. En la economía de monocultivo, las mujeres han de bregar más en el campo porque muchos hombres trabajan fuera de la hacienda.

criar gusanos de seda, cuyos excrementos se utilizan como abono. Una vez recolectado el arroz, se puede avenar el campo para cultivar en seguida en él cebada, hortalizas, caña de azúcar o tabaco.

La alternancia de arroz en invierno y trigo en verano fue habitual en la región china del Yangtsé inferior hace 1000 años. Una prudente selección de variedades prontas en madurar y la abundancia de agua les permitían en el siglo XVII a los agricultores de la región de Cantón obtener dos y hasta tres cosechas por año más unas cuantas recolecciones complementarias de hortalizas; la producción anual total era nada menos que de siete toneladas por hectárea. Como los campos eran pequeños, el equipo preciso para labrarlos era también pequeño, ligero y barato. Un solo búfalo de agua cubría las necesidades de una finca típica; si la producción era realmente intensiva, el labriego podía renunciar por completo al arado y trabajar con la azada.

En general, el cultivo del arroz no requería mucha inversión de capital, comparado con la exigida por los cereales de secano, y son pocas las economías de escala practicables. Aunque un terrateniente del sur de China poseyese tanta tierra como su equivalente inglés, la finca donde tenía su hogar solía ser de tamaño modesto y el resto de sus propiedades lo alquilaba en forma de pequeñas parcelas a muchos arrendatarios, a los que elegía no por lo cuantioso de sus activos sino por sus habilidades y experiencia como cultivadores. Tal sistema no divide a la sociedad rural ni expulsa a los pobres. La ventaja relativa de las parcelas pequeñas garantizaba a un gran número de campesinos el acceso a la tierra, aunque fuese a través de la explotadora relación del arrendamiento.

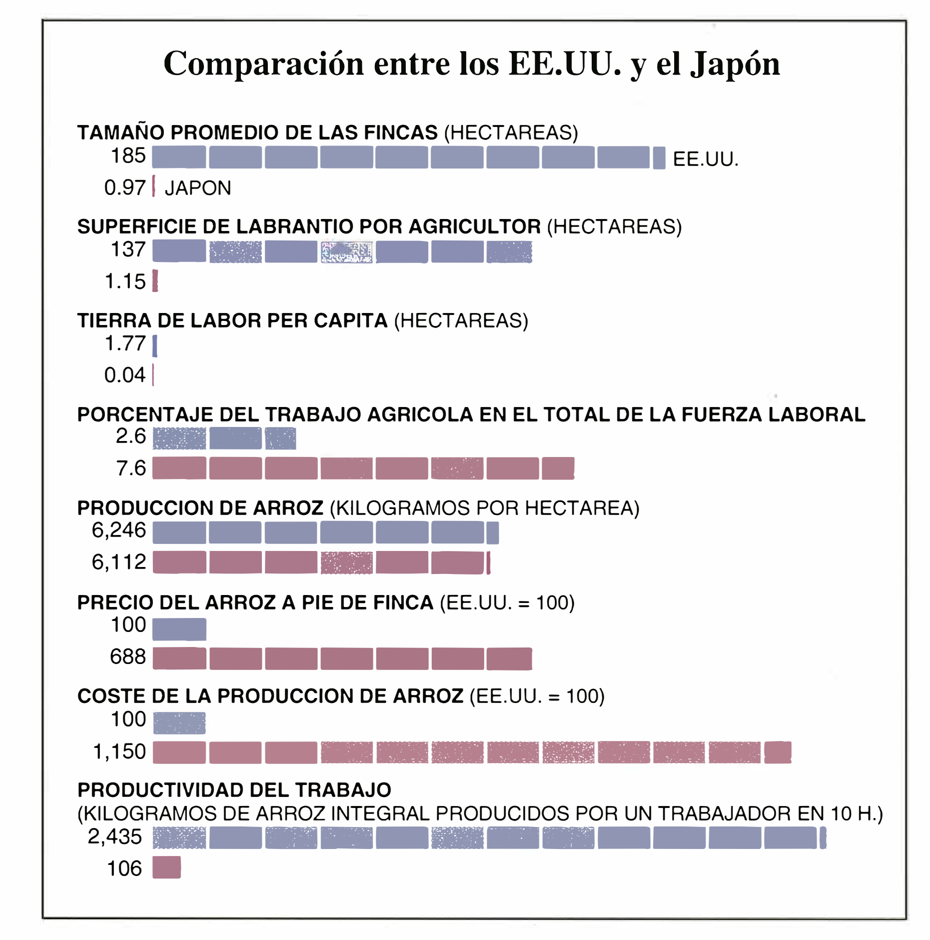
Las exigencias de mano de obra en los húmedos bancales en que se cultiva el arroz son grandes pero intermitentes. En la China y el Japón medievales los campesinos podían, por ello, servirse del cultivo del arroz como base para la producción comercial de hortalizas, azúcar, seda o té, o a la manufactura casera de tejidos, licores, quesos o diversas artesanías. El arroz venía a ser así como el fundamento de una economía rural que requería, y absorbía a la vez, el trabajo de una densa población.

Los historiadores de la economía han solido calificar tal sistema como "agricultura retrógrada", pues cada vez hay que trabajar más para conseguir rendimientos menores. La tesis podría ser cierta si los cálculos se basasen solamente en las producciones de arroz, como si de un monocultivo se tratara. Pero si se tienen en cuenta todos los demás bienes producidos en tal economía, el sistema aparece bajo una luz mucho más favorable. Aunque sus posibilidades de expansión no son infinitas, sí que son considerables. Durante varios siglos de aumento de población, las zonas arroceras de China sentaron las bases de una economía rural en la que muchas de sus gentes producían en sus hogares bienes vendibles. El nivel de vida rural sólo empezó a deteriorarse rápidamente con posterioridad al año 1800, tendencia que se agudizó por efecto de las muchas guerras.

Un proceso de desarrollo campesino parecido se produjo en el Japón, estableciendo los cimientos para la construcción del estado moderno. Esta es una de las razones por las que los agrónomos japoneses consideran su sistema como un modelo exportable. Pero tanto en Japón como en Occidente la industrialización se consiguió ateniéndose a unas pautas de explotación despiadada. De 1600 a 1800 la economía rural se expandió conjuntamente con el auge del comercio y de las ciudades. Se mejoraron las técnicas del cultivo del arroz y la tierra llegó a ser tan productiva que los recursos necesarios para la construcción del moderno estado industrial fueron obtenidos por el gobierno Meiji (1868-1912) principalmente a través de impuestos crecientes a la agricultura. Las exageradas exacciones dejaron a los agricultores en una situación de casi absoluta miseria, que el estado no se sintió obligado a subsanar hasta que, en 1945, se introdujo el sufragio universal.

El nuevo régimen se propuso garantizar la autosuficiencia respecto del arroz y eliminar la pobreza del campesinado. Se promulgaron reformas para acabar con los arrendamientos y se fijaron estrictas limitaciones a la compraventa de terrenos. Estas medidas establecieron como modelo una finca arrocera familiar, minúscula pero independiente, como marco que posibilitase un desarrollo rural a largo plazo, equilibrado e integrado con el urbano.

Sin embargo, la agricultura japonesa está actualmente en crisis. Si exceptuamos la desastrosa cosecha de 1993, causada por el mal tiempo, se produce arroz en exceso y se desperdicia, en gran parte por los fuertes subsidios y los precios políticos que viene pagando el gobierno desde los

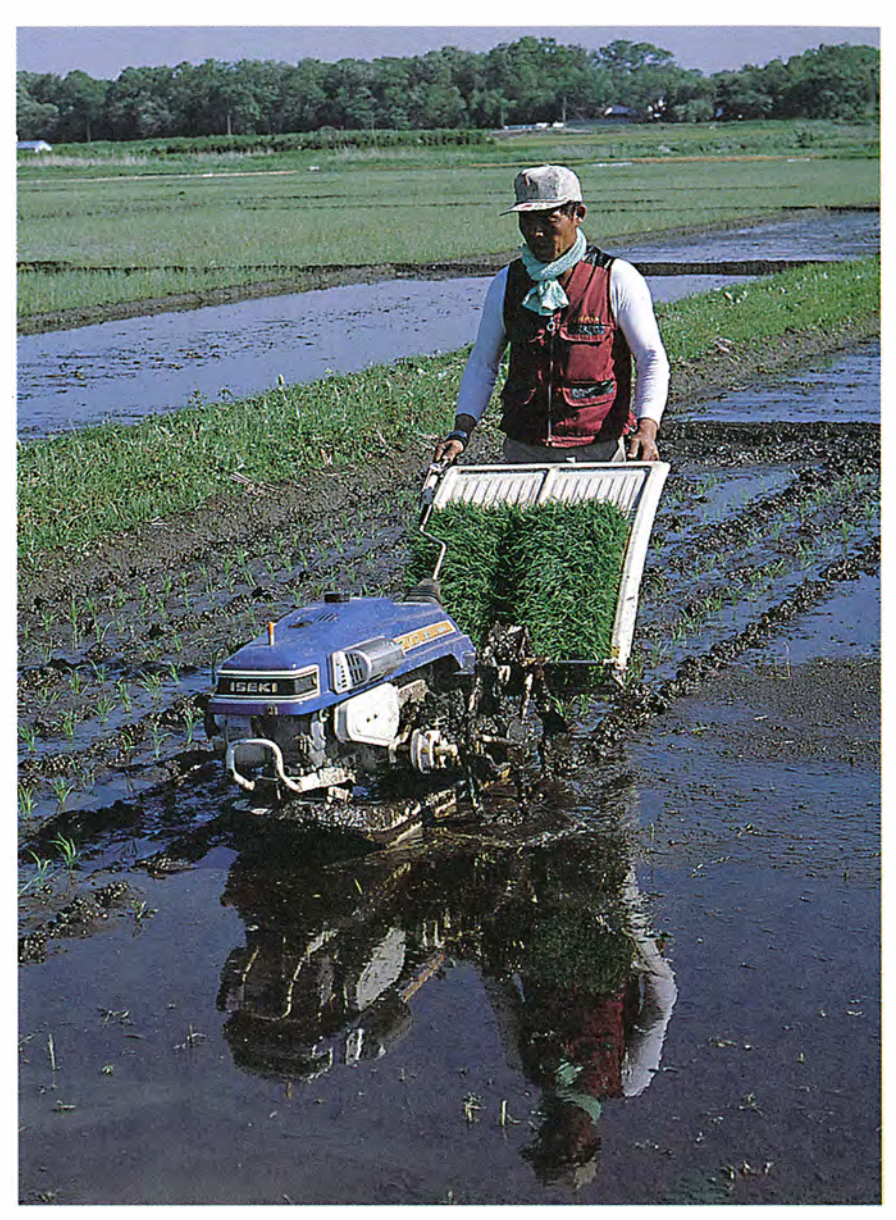


años cincuenta. A la estrategia de incrementar las rentas rurales elevando los precios del arroz le ha salido el tiro por la culata. Todavía un decenio después, los insumos de los labriegos japoneses eran modestos y utilizaban maquinaria sencilla. Pero a partir de entonces la fiebre de la mecanización se apoderó de los arroceros, haciéndoles adquirir pequeños tractores, trasplantadoras y cosechadoras. Hoy en día, prácticamente todos los agricultores poseen una serie de carísimas máquinas, y el uso promedio de fertilizantes es de 1160 kilos por hectárea (mientras que en los EE.UU. es de 160 y en Tailandia de 40). Un cálculo realizado en 1977 por el economista japonés Taketoshi Udagawa indicaba ya que la cantidad de energía empleada en producir el arroz era tres veces superior a la que éste proporciona como alimento. El coste del kilogramo de arroz japonés es 15 veces superior al producido en Tailandia y 11 veces más caro que el norteamericano.

La actual crisis del Japón pone de manifiesto que también el modelo agrícola del Oriente asiático puede desnaturalizarse. Pero sería trágico que los japoneses prestaran dóciles oídos a la invitación que se les hace de que adopten el estilo occidental en vez de tratar de hallar soluciones creativas que puedan ser ecológica y socialmente más satisfactorias.

¿Qué consecuencias pueden extraerse para un desarrollo agrícola viable en otros sitios? No sólo países habitados por sociedades rurales empobrecidas, tales como México y la India, se enfrentan a este problema, sino también naciones ricas que, como Francia, quieran evitar el ulterior despoblamiento de sus campos. La tendencia al monocultivo no es irreversible, pero, en la economía mundial de hoy, la diversificación rural requiere sin duda apoyos estructurales y que se paguen buenos precios por los productos agrícolas. En Japón, donde los consumidores suelen pagar altos precios por la fruta y por las hortalizas, un gran número de cultivadores de arroz se ha convencido de que les conviene convertir parte de sus terrenos en huertas y vergeles. En China, el estado abandonó a finales de los años setenta la política maoísta del "ante todo grano", lo que permitió a los labriegos combinar un nivel básico de cultivo de cereales con otros tipos de plantas y con la ganadería. Al mismo tiempo, los precios de los productos agrícolas subieron a un nivel realista. La producción agrícola aumentó enormemente de la noche a la mañana. Se produjeron no sólo alimentos sino también las materias primas necesarias para el desarrollo de la industria rural. Y se hicieron lo bastante ricos para consumir una amplia gama de productos industriales. Las espectaculares tasas de crecimiento de la China actual sólo pueden entenderse teniendo en cuenta este trasfondo de revitalización de su campo.

Los ejemplos de China y del Japón premodernos muestran que el policultivo intensivo, precisamente por no depender de costosas inversiones, puede proporcionar sustento a los campesinos más pobres, ofrecer un amplio acceso a la tierra y generar otras oportunidades de empleo.



4. EL ARROZ se cultiva cada vez más con máquinas ajustadas al tamaño de los arrozales. Aquí vemos a un campesino japonés trabajando con una que trasplanta brotes al campo encharcado.

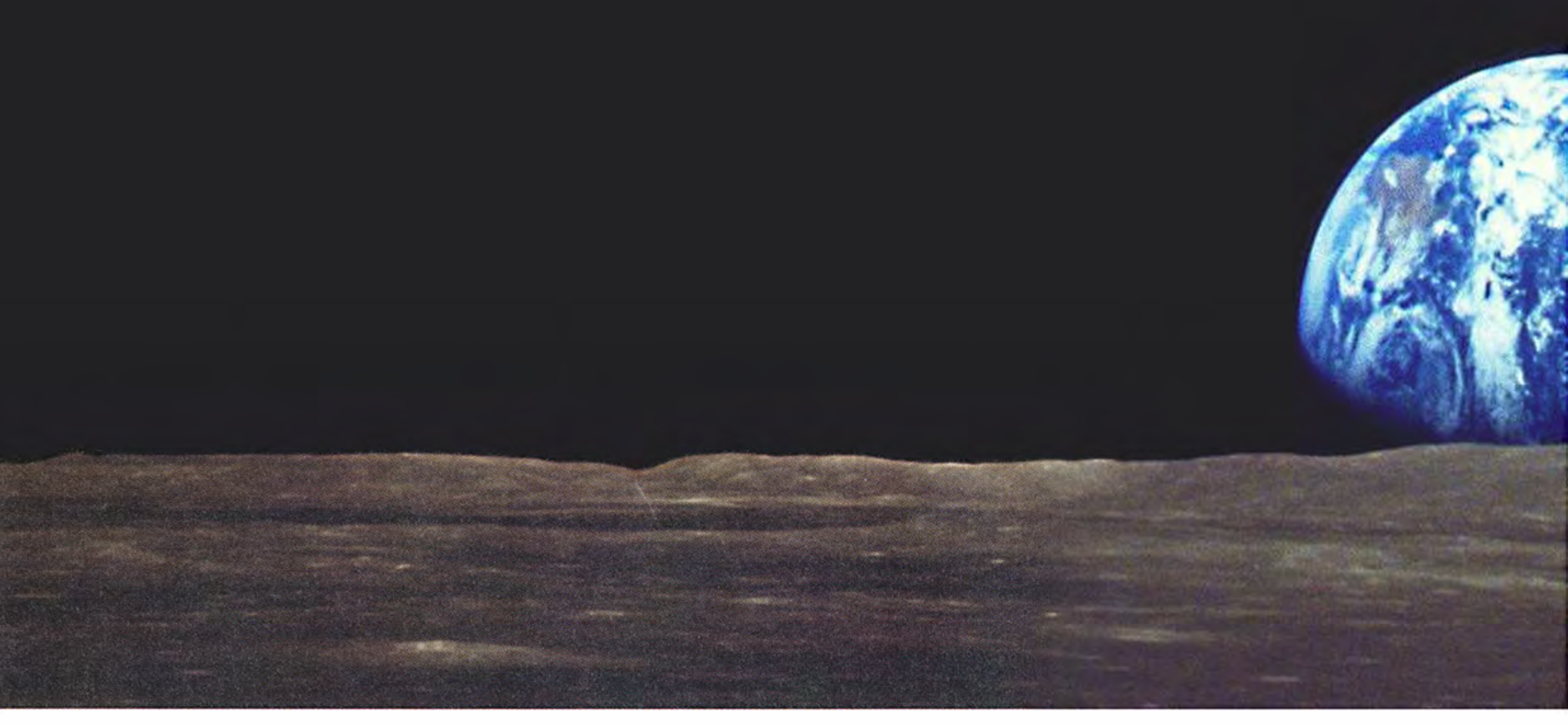
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

JAPANESE AGRICULTURE: PATTERNS OF RURAL DEVELOPMENT. Richard H. Moore. Westview Press, 1990.

THE VIOLENCE OF THE GREEN REVOLUTION: THIRD WORLD AGRICULTURE, ECOLOGY AND POLITICS. Vandana Shiva. Zed Books y Third World Network, 1991.

JAPANESE AND AMERICAN AGRICULTURE: TRADITION AND PROGRESS IN CONFLICT. Luther Tweeten, Cynthia L. Dishon, Wen S. Chern, Naraomi Imamura y Masaru Morishima. Westview Press, 1993.

THE RICE ECONOMICS: TECHNOLOGY AND DEVELOPMENT IN ASIAN SOCIETIES. Francesca Bray. University of Califomia Press, 1994.



El legado científico del proyecto Apolo

Las piedras lunares traídas a la Tierra han servido para zanjar cuestiones relativas al origen de la Luna, a su composición e incluso a las condiciones primigenias que afectaron a la vida en nuestro planeta

G. Jeffrey Taylor

Cuando hace veinticinco años escarbaron en la superficie de la Luna, Neil Armstrong y Edwin "Buzz" Aldrin, Jr., no sólo recogieron un polvo seco y oscuro, sino que emprendieron un viaje por el tiempo. Los 380.000 kilómetros que recorrieron en el *Apolo 11* les mandaron miles de millones de años atrás. Armstrong, Aldrin y los diez astronautas que les siguieron trajeron consigo muestras en las que se guarda la fascinante historia de la Luna y de la Tierra. Esas piedras han apuntado cuál fue el violento y sorprendente origen de la Luna, y también su composición y edad. Gracias a los instrumentos colocados en la superficie del satélite, los geofísicos han podido reconstruir su estructura interna y su actividad. Sin el programa Apolo, ninguno de estos descubrimientos hubiera tenido lugar.

Al viajar a la Luna, aprendimos también cosas sobre la Tierra. El vulcanismo, los plegamientos, las fallas, la formación de montañas, la meteorización y la glaciación han borrado o modificado casi toda la historia antigua de la Tierra. Afortunadamente, la Luna no fue una máquina geológica tan enérgica. Durante los primeros mil millones de años su actividad produjo una compleja y desconcertante serie de fenómenos, pero no fue tan intensa que borrara por completo la crónica de lo ocurrido. Los modelos teóricos que intentan explicar los mecanismos de creación de cráteres, coladas de lava y residuos volcánicos de la Tierra pueden contrastarse aplicándolos a las formaciones lunares análogas.

Las misiones Apolo, por supuesto, no modificaron instantáneamente las ideas que había acerca de nuestra vecina celeste más próxima. El análisis de las muestras y la formulación de teorías razonables a partir de esos datos experimentales llevaron varios años. Se recogieron 382 kilogramos de material lunar de seis sitios. Las piedras se oxidan rápidamente cuando están expuestas al aire, así que se las protegió de éste en una cámara llena de nitrógeno y carente de

G. JEFFREY TAYLOR, que recibió su doctorado en geología por la Universidad Rice en 1970, es profesor del Instituto Hawaiano de Geofísica y Planetología, Escuela de Ciencias y Tecnología del Océano y la Tierra, Universidad de Hawai en Manoa, Honolulu. Preside el grupo de trabajo de la ciencia de la exploración lunar, comité que asesora a la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) sobre futuras misiones lunares.



1. SALIDA DE LA TIERRA sobre la región del Mare Smythii, que se encuentra en el limbo oriental de la Luna. La fotografía se tomó desde el *Apolo 11* hace veinticinco años. Simboliza la idea de que se puede aprender sobre la Tierra estudiando la Luna.

humedad del Centro Espacial Lyndon B. Johnson de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), en Houston.

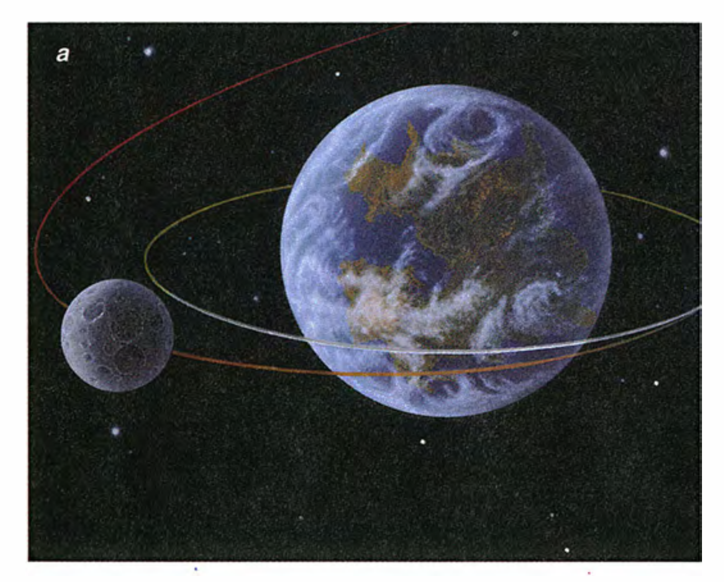
Uno de los primeros problemas resueltos por las muestras fue el de la edad de la Luna. La datación isotópica mostró que se formó al mismo tiempo que la Tierra, hace cuatro mil quinientos millones de años. También indicaron que la Luna estuvo geológicamente activa hasta hace unos dos mil millones de años. Pero se requirió más tiempo para responder a otras grandes preguntas; no se logró el consenso sobre la teoría del origen de la Luna hasta 1984, doce años después de la última misión Apolo. El acuerdo se forjó en un congreso que organizamos William K. Hartmann, Roger J. Phillips y yo. Se celebró en Kona, en la gran isla de Hawai. Dada la tenacidad con que los científicos se aferran a sus opiniones, no nos imaginábamos que ninguna de las hipótesis existentes acerca del origen de la Luna fuese a imponerse a las otras, a convertirse en candidata hegemónica. Y mucho menos aún que, tras el congreso, la favorita no fuera una de las tres hipótesis clásicas. Cada una de ellas tenía defectos que algunos consideraban decisivos, pero también ardientes defensores. Es un tributo a la persistencia y a la imaginación humanas que tantos investigadores se esforzaran tanto en adaptar su idea preferida a la lista creciente de los hechos. Muchos castillos de naipes cayeron en Kona.

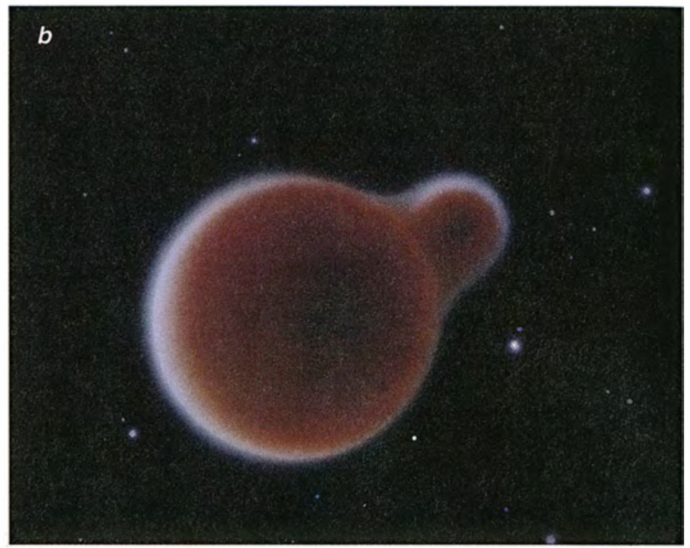
De las ideas clásicas que se presentaron en el congreso, la que menos contaba era la hipótesis de la captura. En su forma original, sostenía que la Tierra apresó una Luna completamente formada que venía de alguna parte del sistema solar. En principio, esta captura es posible, pero improbable. Lo probable es que un cuerpo que pasase cerca de la Tierra chocara con ella o recibiese un impulso gravitacional que alterase tanto su órbita que no volviera a toparse con el planeta nunca más. Las posibilidades de que las órbitas de la Luna y la Tierra fuesen exactamente las requeridas para que se produjera la captura son tan insignificantes, que pocos había que no rechazasen la idea.

La misión Apolo contribuyó a que esta teoría pasase a mejor vida. Las muestras lunares pusieron de manifiesto que la Luna y la Tierra tenían cantidades parecidas de los isótopos del oxígeno, lo que indicaba un parentesco estrecho. Si la Luna se hubiese formado en otra parte del sistema solar, su oxígeno habría tenido probablemente una composición isotópica diferente a la de la Tierra.

La segunda idea clásica sobre la génesis de la Luna era la hipótesis de la fisión, de larga y honrosa historia. George Darwin, el segundo de los diez hijos de Charles, fue el primero en plantearla, al proponer que hubo una época en que la Tierra, formado ya su núcleo, giró, durante un tiempo, extremadamente deprisa, con lo que se ensanchó tanto por el ecuador que un pequeño pedazo salió despedido y se convirtió en la Luna. Este orden de cosas explicaría muy bien una propiedad crucial de nuestro satélite, cuya existencia dedujeron los astrónomos hace más de cien años, pues calcularon que, por su tamaño y características orbitales, la Luna tenía que ser menos densa que la Tierra. De esa poca densidad se seguía que el núcleo metálico de la Luna debía ser pequeño, si es que llegaba a tenerlo. La fisión lo explicaría, un cuerpo así engendrado estaría hecho sobre todo de manto terrestre.

Cálculos posteriores mostraron que la Tierra tendría que haber dado una vuelta cada dos horas y media para que se le hubiera desprendido la cantidad de material necesaria para convertirse en la Luna. Un día tan corto es uno de los principales problemas de la hipótesis: para empezar, nadie tiene idea de por qué habría de girar tan deprisa la Tierra. En los modelos de formación del planeta por acumulación de granos de polvo, la Tierra acaba rotando bastante despacio, e incluso es dudoso que lo haga. No sirve de nada añadir sucesos que impartan momento angular, en especial los impactos de planetesimales de hasta unos cientos de kilómetros de diámetro. Las simulaciones por ordenador muestran que por cada objeto que chocase con la Tierra y le añadiese un giro en el sentido de las agujas del reloj, habría otro que le haría girar al revés. Y si hubiese un mecanismo que suministrara a la Tierra el suficiente momento angular, sus partidarios tendrían que buscar todavía una manera de eliminar buena parte





2. LAS HIPOTESIS sobre la formación de la Luna eran muy variadas. La de la captura (*a*) sostiene que la Luna es un cuerpo atrapado. Según la de la fisión (*b*), la rotación rápida de la Tierra primitiva desprendió un pedazo, que se convirtió en la

de esta energía, pues el actual sistema Tierra-Luna apenas tiene la cantidad de momento necesaria para iniciar la separación de los dos cuerpos entre sí. Sin embargo, los cálculos dejan un margen de maniobra intelectual suficiente para evitar el rechazo de la hipótesis por meras razones dinámicas.

El programa Apolo ofreció una nueva contrastación de la idea. Si la Luna se hubiese desprendido de la Tierra de esa manera, su composición tendría que ser exactamente igual a la de ésta cerca de la superficie (en concreto, en la corteza y el manto). La Luna y la Tierra tienen las mismas cantidades de isótopos de oxígeno, lo que indica que los dos cuerpos guardan algún tipo de parentesco. Pero la similitud de sus composiciones acaba ahí. Las muestras lunares, una red de sismómetros dejada en la Luna y los estudios espectroscópicos de los *Apolo 15* y *16* ofrecieron datos decisivos con los que se pudo concluir que las composiciones químicas de la Tierra y de la Luna son diferentes.

La Luna tiene, por ejemplo, muchos menos materiales volátiles —sustancias de evaporación fácil— que el manto de la Tierra. El satélite carece por completo de minerales que contengan algo de agua: es absolutamente seco. Carece también de otros tipos de elementos volátiles, de los más comunes, como el potasio y el sodio, o de los más raros, como el bismuto y el talio. Se ha descubierto además que la Luna es más rica que la Tierra en sustancias no volátiles, elementos refractarios que entran en ebullición a altas temperaturas. Parece que la concentración de refractarios —aluminio, calcio, torio y tierras raras— en la Luna es un cincuenta por ciento mayor que en la Tierra. Otra prueba adversa a la fisión fue la razón entre dos sustancias corrientes, el óxido de hierro y el de magnesio, que parece ser alrededor del 10 por ciento mayor en la Luna que en la corteza y el manto terrestres.

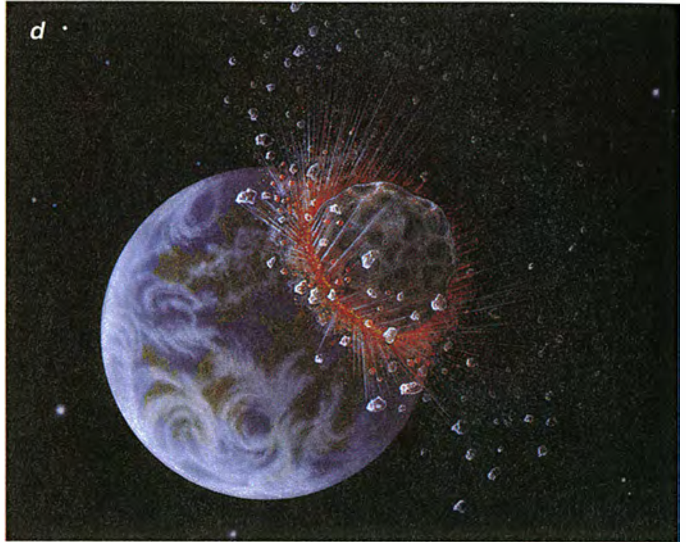
Aunque sus partidarios buscaron argumentos de refuerzo, a la larga los datos del programa Apolo han convencido a la mayoría de los investigadores de que el modelo de la fisión no satisface la prueba de la composición material.

La tercera idea clásica es la hipótesis del doble planeta, según la cual la Luna y la Tierra se formaron juntas a partir de una nube de gas y polvo; la materia prima de aquélla, por tanto, salió de un anillo de material en órbita alrededor de la Tierra. A medida que la Tierra creció, también lo hicieron el anillo y la Luna embrionaria que contenía. A esta hipótesis siempre le ha sido difícil explicar por qué el núcleo metálico de la Luna es tan pequeño, comparado con el terrestre. Richard G. Greenberg, Stuart J. Weidenschilling y algunos de sus colegas se enfrentaron al problema durante el año anterior al congreso de Kona. Propusieron que el anillo orbital hacía de filtro de la composición. Las partes rocosas de los cuerpos incidentes se romperían con facilidad, incorporándose al anillo, mientras que las metálicas lo atravesarían con destino a la Tierra.

Buena parte de la discusión se centró en la eficacia del proceso; se expresaron muchas dudas sobre la separación en núcleos y mantos de los cuerpos incidentes. Aunque esta hipótesis explica la semejanza de composiciones entre la Tierra y la Luna por lo que se refiere a los isótopos del oxígeno, no puede dar cuenta de las diferencias que hay en los materiales volátiles y refractarios. Y lo que es más importante, tropieza con el problema del momento angular. Es decir, no explica por qué la rotación de la Tierra llegó a ser de veinticuatro horas, giro más rápido que el predicho por los modelos de acumulación simple, ni cómo el anillo pudo adquirir el suficiente movimiento circular para permanecer en órbita.

Lo que nos dejó sorprendidos a todos en Kona fue la entusiasta recepción que tuvo una idea ignorada desde hacía mucho: la teoría del impacto gigantesco. Entre los más desconcertados estaba Hartmann, coorganizador del congreso y sus originadores. Al final de las deliberaciones se llegó a un claro consenso: mientras la Tierra iba creciendo, el impacto de un gran proyectil le arrancó la materia de la que saldría la Luna. Por supuesto, no faltaron los inmovilistas escépticos y quienes se aferraban desesperadamente a alguna de las viejas ideas, pero la teoría del impacto gigantesco cautivó a la mayoría de los participantes.

No era una hipótesis absolutamente nueva. Como un actor que logra el éxito "de la noche a la mañana", tras llevar años ejecutando papeles secundarios, fue durante mucho tiempo una teoría del montón. Hartmann y su colega Donald R. Davis la enunciaron en 1975. Estaban investigando la formación de planetas por acumula-

Luna. Conforme a la del planeta doble (*c*), la acumulación de granos de polvo formó la Tierra y la Luna. La teoría ahora dominante, (*d*), afirma que un impacto gigantesco puso en órbita los residuos que constituirían la Luna.

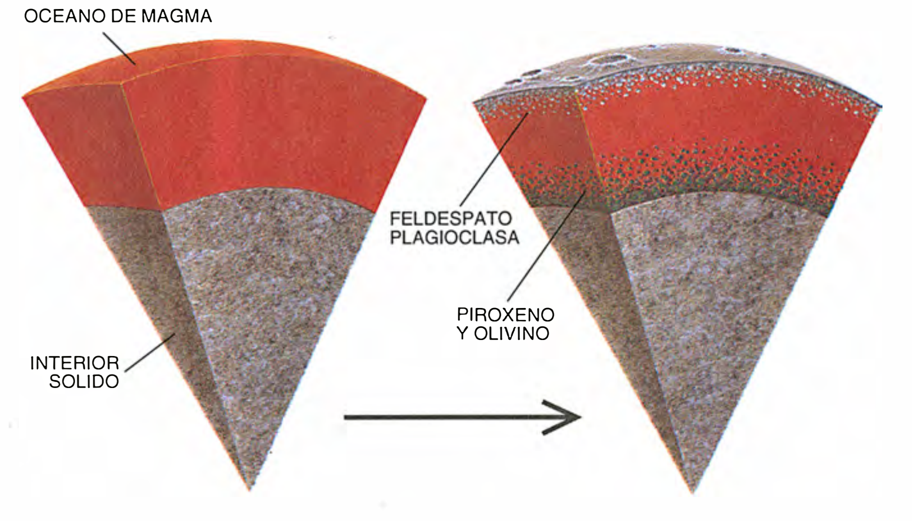
ción de objetos menores y vieron que alrededor de la Tierra habrían vagado numerosos cuerpos grandes, algunos del tamaño de Marte. Hartmann y Davis supusieron que la Tierra chocaba con uno de ellos, a consecuencia de lo cual parte de los residuos sería puesta en órbita, ofreciendo así la materia prima de la Luna. Alastair G. W. Cameron y William R. Ward formularon independientemente la misma idea un año después, mientras intentaban resolver el problema del momento angular. Abordaron también los detalles del mecanismo por el que el material entró en órbita y no cayó de nuevo a la Tierra.

El geólogo, ya fallecido, Reginald A. Daly se anticipó, en casi treinta años, al trabajo de Hartmann y Davis. Dos distinguidos pioneros de la ciencia lunar, Ralph B. Baldwin y Don E. Wilhelms cayeron en la cuenta de que Daly había sugerido en 1946 que la Luna se formó a partir de la Tierra por el impacto oblicuo de un objeto de tamaño planetario. Aunque los análisis de Daly tienen errores, la idea del impacto gigantesco está claramente formulada en su penetrante y totalmente ignorado artículo. Pero aunque se hubiese conocido, no habría tenido consecuencias, pues se publicó antes de que se viese que los impactos eran fenómenos planetarios importantes.

A pesar de esta larga permanencia en la sombra, nada desde su reaparición en Kona en 1984 ha hecho tambalear su firme posición de teoría dominante. La razón es que da cuenta de muchas observaciones. La causa de que la Luna carezca de hierro metálico en su centro es que el núcleo del cuerpo que golpeó a la Tierra se quedó en ella, formándose la Luna de las partes de silicato de ambos objetos. La diferente relación entre el óxido de hierro y el de magnesio en la Tierra y en la Luna se debe a que la Luna se formó sobre todo a partir del cuerpo que se estrelló. (Se presupone que el proyectil contenía menos óxido de hierro que la Tierra.)

La Luna está seca por el incalculable calor que se produjo durante la colisión: las altas temperaturas evaporaron el agua y las demás sustancias volátiles. La abundancia de materiales refractarios se debe a su rápida recondensación, quedando incorporados al satélite. La identidad de la composición isotópica del oxígeno de la Tierra y de la Luna resulta de que ambos cuerpos se formaron en la misma región del sistema solar en evolución. En fin, la hipótesis da cuenta del problema más difícil: el momento angular del sistema Tierra-Luna. El proyectil tuvo que golpear a la Tierra lateralmente, a una cierta distancia del eje central. Un impacto de este tipo habría acelerado la rotación de la Tierra hasta su valor actual.

El aspecto más atractivo de la teoría del impacto gigantesco es que los choques de esa índole son consecuencias naturales de la formación de los planetas. No hay por qué recurrir a circunstancias inusuales o *ad hoc*. Una catástrofe así, por enorme que sea, no es improbable; es más, la composición de Mercurio y la gran inclinación de Urano se explican hoy mediante impactos gigantescos. Si no



3. SE CREE QUE UN OCEANO de magma rodeó en una época la Luna, por encima de su interior sólido. A lo largo de cien millones de años, el magma fue cristalizando despacio. El material más ligero —feldespato plagioclasa, sobre todo— se elevó hasta la superficie y terminó por formar la corteza lunar. Los compuestos más pesados —principalmente olivino y piroxeno— se hundieron y dieron lugar al manto.

hubiese ocurrido este evento colosal en los primeros tiempos del sistema solar, no habría una Luna en el cielo y la Tierra no giraría tan deprisa ni tendría mareas tan fuertes. Pero en tal caso lo más probable es que no estuviésemos aquí para darnos cuenta de ello.

Además de zanjar la cuestión del origen de la Luna, las muestras de los Apolo permitieron deducir la estructura y la evolución del satélite. Los procesos internos han transformado también considerablemente las características de la Luna, aunque a mucha menor escala que en la Tierra. Una masa gigantesca de magma, de cientos de kilómetros de profundidad, que al parecer rodeó la Luna y contribuyó a formar la corteza y el manto lunares, precipitó los acontecimientos. La teoría del océano de magma ha sido un elemento central de la ciencia lunar desde que el *Apolo 11* trajo las primeras muestras.

El *Eagle* se posó sobre la superficie del Mar de la Tranquilidad, una de las áreas, o mares, de color gris oscuro que hacen que la Luna parezca un rostro humano y son el residuo de los vastos flujos de lava que se vertieron sobre su superficie hará miles de millones de años. Las muestras traídas por Armstrong y Aldrin pertenecían a la superficie misma que pisaban: lecho de roca basáltico rico en titanio. También las trajeron del regolito lunar, que está hecho de material suelto, caído de nuevo a la Luna tras haber sido arrancado de ella por los impactos de meteoritos. Es la versión lunar del suelo terrestre y cubre la mayor parte de su superficie hasta profundidades de veinte metros.

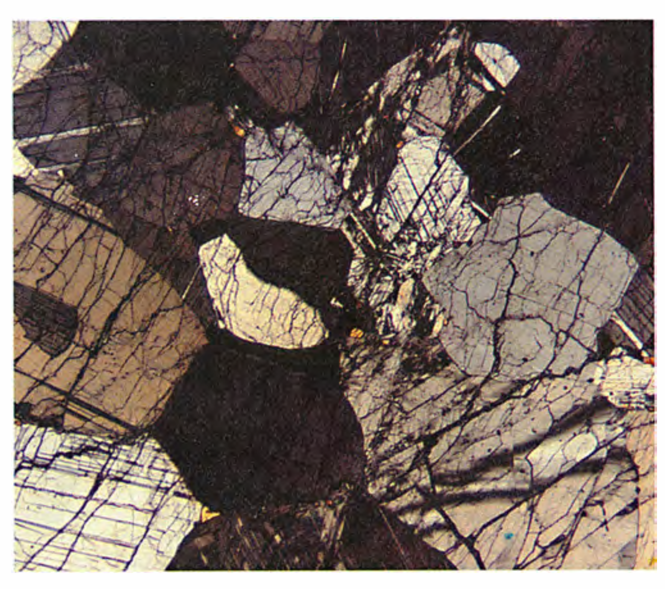
Las muestras de regolito contienen un pequeño porcentaje de piedras blancas y de guijarros, compuestos principalmente de silicatos de calcio y aluminio, que reciben el nombre de feldespatos plagioclasas. Algunas de ellas, las anortositas, sólo estaban formadas por ese feldespato. John A. Wood y Joseph V. Smith propusieron de forma separada que esas partículas anómalas del regolito llegaron a él por impactos que se produjeron en tierras altas (las zonas de color claro de la Luna) lejanas. Por tanto, arguyeron, en las cordilleras debía dominar la piedra rica en feldespatos. Esta audaz extrapolación fue confirmada por el *Apolo 16*, por otros ingenios que se posaron allí y por mediciones remotas.

Pero no les bastó a Wood y Smith con esa extrapolación. Se preguntaron por qué las cordilleras eran tan ricas en feldespatos plagioclasas. Este material se podría haber acumulado por encima del magma, como cubos de hielo que flotasen en un vaso de agua. Hechos así ocurrieron en la Tierra en grandes cuerpos magmáticos, las intrusiones estratificadas. Estas estructuras se forman cuando los minerales densos se hunden y los livianos salen a flote. Según Wood y Smith, los feldespatos flotaron en un "mar" de magma y acabaron por crear la corteza lunar. Los minerales pesados, compuestos de silicatos de hierro y de magnesio —olivino y piroxeno—, se hundieron y crearon el manto. Continuaron su razonamiento indicando que, si todas las zonas montañosas eran ricas en feldespatos, entonces el magma tenía que haber estado en todas partes y rodeado la Luna entera. Así nació la idea del océano de magma, en la que ni siquiera se había pensado antes de las misiones Apolo.

En apoyo de la idea del océano de magma viene un grupo de rocas aparentemente inconexo, los basaltos de los mares lunares. Son ricas en olivino y piroxeno, los materiales pesados que se hunden en él; irrumpieron en la superficie en forma de lava hace tres mil millones de años y, lo que es más importante, les falta un elemento de traza, el europio; el feldespato plagioclasa de las montañas, sin embargo, es rico en europio. Este enriquecimiento de las zonas altas viene a ser igual a la carencia que tienen los basaltos de los mares. Estos hechos fortalecen la suposición de que tanto los mares como las cordilleras emergieron del océano de magma, sólo que, durante su formación, las montañas ricas en feldespatos acopiaron más europio que los basaltos de los mares.

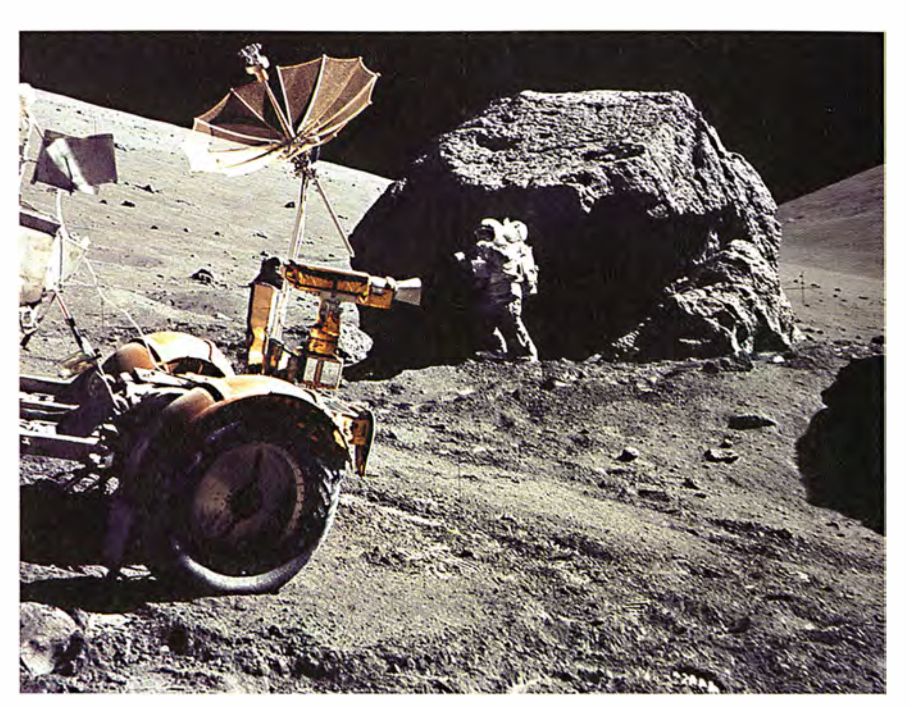
La existencia de un océano magmático suscita una pregunta: ¿cómo se creó, por lo pronto? En concreto, ¿de dónde salió la energía necesaria para licuar la materia planetaria? El proceso de formación del núcleo podría haber aportado una cierta energía: el hundimiento del hierro metálico libera calor. El inmenso impacto que condujo a la formación de la Luna aportó más. Los geofísicos han examinado el problema en detalle; su conclusión es que el choque causó la formación de una gran cantidad de materia fundida. Tanta, que hasta un sesenta y cinco por ciento del proyectil y de la Tierra se convirtieron en magma.





4. LA ANORTOSITA es un tipo de roca de las tierras altas lunares (*izquierda*). La luz polarizada descubre su composición (*derecha*). Las diferentes sustancias polarizan la luz de modos diversos y, con filtros, se las puede identificar por el color. Todos los minerales del gris al blanco son feldespatos. Los granos anaranjados son minerales de hierro y magnesio.

La idea del océano de magma se aplica ahora también a otros planetas. Ha cambiado la manera en que se aborda la evolución del sistema solar y la historia de sus primeros tiempos. Se intenta determinar en el laboratorio cómo se formaron los minerales del magma y cómo se repartieron los elementos de traza entre el magma y los materiales cristalizados. Otro grupo de investigadores estudia procesos que pudieron haber actuado en un océano magmático terrestre hace cuatro mil quinientos millones de años (la actividad geológica del planeta desde entonces ha borrado todo rastro suyo). Por mi parte, estoy poniendo en orden los indicios que hay de que algunos asteroides, especialmente los que han formado núcleos de hierro, también tuvieron océanos de magma en las primeras etapas de su historia.



5. HARRISON H. SCHMITT, astronauta del *Apolo 17*, está situado junto a una roca cuyos materiales se fundieron como consecuencia del impacto de un enorme proyectil hace unos 3860 millones de años, resultado del cual es el Mare Serenitatis, de 920 km de diámetro. Las muestras recogidas en lugares seleccionados han permitido comprobar la importancia de los cráteres de impacto en la formación de los planetas.

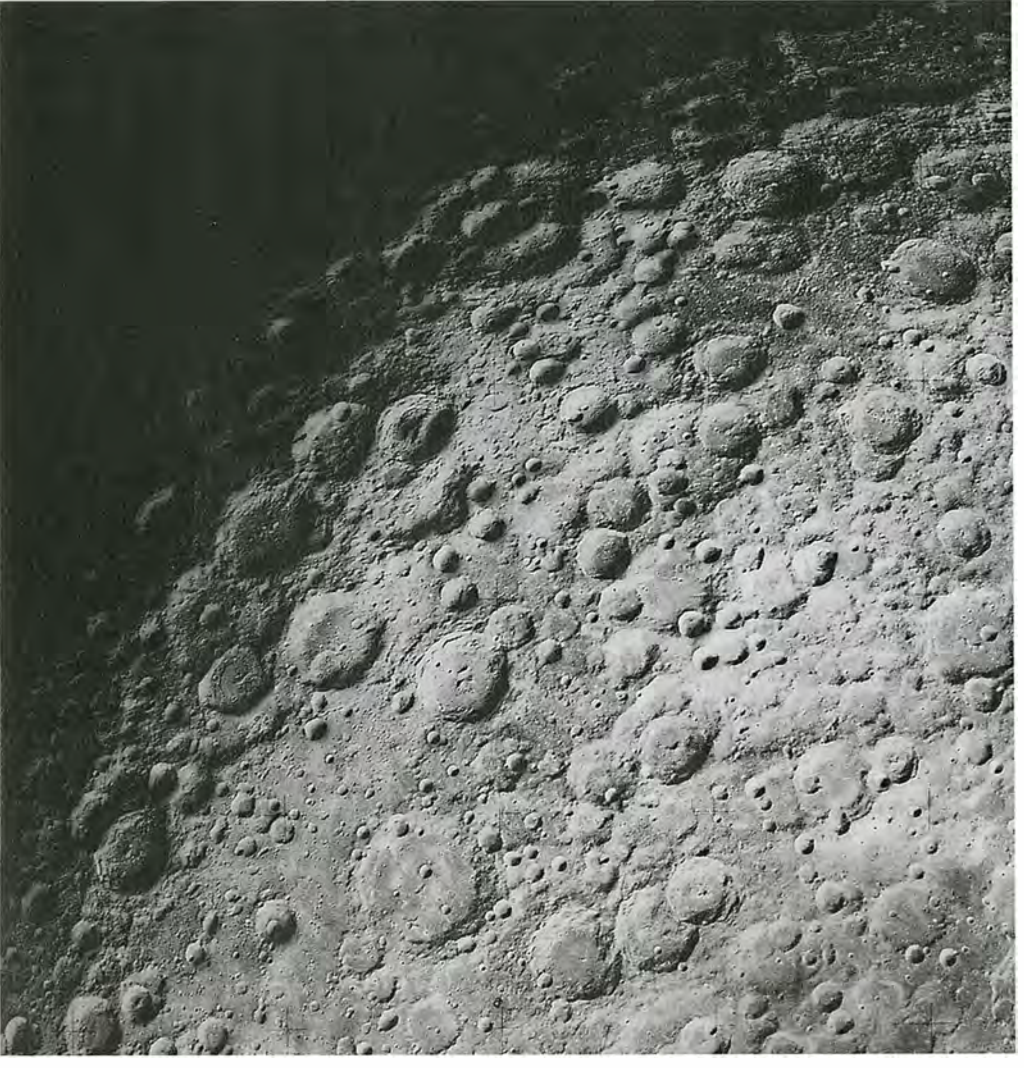
Aunque las pruebas son convincentes, hay investigadores que todavía se mantienen escépticos acerca de la teoría del magma oceánico y citan la existencia de montañas lunares que carecen de feldespatos. La prueba final requiere un rastreo global de la corteza de las cordilleras desde una órbita lunar. La sonda *Clementine*, misión del Departamento de Defensa cuyo objetivo es poner a prueba sensores avanzados, ha completado hace poco su tarea de confeccionar un mapa espectroscópico de la Luna. (La NASA no tiene planeadas misiones que exploren la Luna.) La información de los sensores de la *Clementine* quizás ofrezca los datos cruciales necesarios para establecer la cantidad de feldespato plagioclasa que hay en la corteza.

Tras la enorme colisión y la formación estructural resultante del océano de magma, la evolución lunar experimentó otra fase: la generación de cráteres de impacto. Este gran proceso geológico todavía sigue afectando a los planetas. No siempre se apreció su importancia, pues, antes de la era espacial, muchos sostenían que los cráteres y cavidades de la Luna se formaron por vulcanismo. Pero a medida que los días de las misiones Apolo se acercaban, el conocimiento de los procesos de impacto y de sus productos aumentó mucho. Los geólogos demostraron que muchas estructuras circulares de la Tierra se formaron a causa de colisiones con objetos extraterrestres; las estudiaron y establecieron sus características esenciales. Otros experimentaron con cráteres en sus laboratorios, mediante pistolas que propulsaban los proyectiles a velocidades de varios kilómetros por segundo hacia los blancos donde se estampaban.

El primero que reunió pruebas de peso de que los cráteres lunares fueron creados por impactos fue el renombrado geólogo Grove K. Gilbert, cuyas contribuciones abarcaron desde la cartografía básica a la hidrogeología. En 1893 publicó un artículo clásico, *El rostro de la luna*, el primer estudio geológico del satélite. Gilbert identifica correctamente los mares como vastas llanuras de lava. Describe también los cráteres y explica por qué no podían ser volcánicos. Como el artículo de Daly sobre el origen de la Luna, éste también cayó en el olvido durante decenas de años. La idea no reapareció hasta principios de los años cuarenta, cuando Baldwin empezó a estudiar la Luna. Paradójicamente, Baldwin conoció la importante obra de Gilbert en 1948, gracias a una carta de Daly.

Las cordilleras son las que han recibido más impactos, según indican las rocas. La mayor parte de las muestras fueron fundidas, mezcladas, trituradas y comprimidas por ondas de choque. Estas rocas, las brechas, son tan complicadas como un grabado de M. C. Escher. Sus edades son sorprendentes. En 1974, Fouad Tera, Dimitri A. Papanastassiou y Gerald J. Wasserburg creyeron percibir dos edades nítidamente diferenciadas en ellas. La primera es de unos 4400 millones de años, que Tera y sus colegas tomaron por la del final de la diferenciación lunar primaria (básicamente, cuando el océano de magma terminó de cristalizarse). La otra es de unos 3900 millones de años; fue una época de bombardeo intenso que barrió todo indicio de los bombardeos previos; los impactos "pusieron a cero" las edades de las rocas superficiales. Apodaron a este violento período "cataclismo lunar". La idea es que la mayor parte de las cuencas y de los grandes cráteres de la Luna se formaron en un breve intervalo de tiempo, de 3850 a 4000 millones de años, más o menos. En efecto, entre las muestras datadas, las edades de prácticamente todos los fragmentos obtenidos de los vuelos del programa Apolo y de la misión rusa Luna 20 caen en un margen de 3850 a 3950 millones de años.

Algunos no les gusta la idea del cataclismo. Baldwin arguyó que la agrupación aparente de las edades era ilusoria y que las fechas estaban contaminadas por la extensa distribución de los residuos arrojados; en concreto, por los residuos que se originaron en el inmenso suceso que formó la cuenca de Imbrium, un hueco de 1300 kilómetros de ancho, el ojo derecho de la cara de la Luna. Baldwin indicó también que las partes elevadas de las cuencas grandes se han hundido gradualmente, lo que muestra que se formaron hace más



6. ZONA MONTAÑOSA, plagada de cráteres, del extremo oriental del Mare Smythii. Su formación pudo tener lugar durante el período conocido como cataclismo lunar, una época de intenso bombardeo de la Luna entre 3850 y 4000 millones de años atrás.

de 3950 millones de años, quizá hasta hace 4300 millones de años. Hartmann cree que la agrupación de edades en torno a los 3900 millones de años señala el final de un flujo de proyectiles decreciente, restos de la acumulación planetaria. La escasez de muestras anteriores a ese período resultaría de lo que llamó "un muro de piedra". A medida que los impactos recalentaban las rocas más viejas, sus edades se restablecían una y otra vez a 3900 millones de años, con lo que sólo quedaron registrados los últimos impactos. Los argumentos de Hartmann y de Baldwin convencieron a la mayoría de los investigadores, de modo que la posibilidad del cataclismo —el impresionante incremento del ritmo de los impactos entre hace 3850 y 4000 millones de años— quedase arrumbada o, por lo menos, ignorada.

El exilio del cataclismo duró más de diez años, hasta que en 1990 Graham Ryder hizo que la idea reviviese vigorosamente señalando tres cosas. Una es que la edad de las piedras no se restablece tan fácilmente. Los estudios recientes del efecto de los impactos en las edades demuestran que los únicos materiales cuyas edades se ven afectadas son los que se funden durante el impacto y puede que otro pequeño porcentaje de otras rocas de la diana. La mayoría son trituradas y salen disparadas por todas partes, pero no se calientan demasiado.

Contra la idea de la muralla de Hartmann están las muestras de flujos de lava halladas entre los especímenes del *Apolo 14*. Las edades de estas piedras caen entre los 3900 y los 4300 millones de años, lo que indica que las edades pueden conservarse aunque las rocas correspondientes hayan sido muy propensas a la demolición, dada su posición sobre la superficie lunar.

La tercera consideración importante de Ryder va contra la suposición de que todas las muestras reflejan la edad de la enorme cuenca de Imbrium, idea considerada simplista por la mayoría de los especialistas actuales. Las cordilleras incluyen muchos grupos, químicamente distintos, de rocas fundidas por impacto, lo que sugiere que hubo varias colisiones. Y las edades se acumulan entre los 3850 y 3950 millones de años.

Siguen discutiéndose las cuestiones del número exacto de sucesos que están datados correctamente y de cuántos impactos constituyen un cataclismo. Los puntos de vista discordantes que se han expresado sobre las hipótesis del cataclismo y de la muralla derivan en parte de dos formas de encarar el estudio de la Luna. Ryder defiende que hubo un cataclismo porque tiene cierta confianza en lo que las muestras lunares nos dicen. A Hartmann le interesa más cómo se forman los planetas por acumulación, y prefiere por tanto la teoría del muro de piedra. La conciliación de ambas perspectivas requiere que se obtengan más muestras de la Luna.

Parece que el bombardeo que produjo los cráteres lunares no fue un fenómeno exclusivo, sino que lo mismo ocurrió en todo el sistema solar interno. En Marte y Mercurio hay terrenos antiguos cubiertos de cráteres; Mercurio, de hecho, se parece mucho a la Luna. (Venus es tan activo que sus características primigenias no pudieron sobrevivir.) Es también probable que fuesen numerosos los proyectiles que golpearon la Tierra primitiva. Los cráteres lunares permiten hacerse una idea del tamaño de alguno de los objetos que se estrellarían en el planeta. La Luna tiene 35 cuencas de más de 300 kilómetros de ancho. Con que sólo la mitad se hubiese formado entre hace 3850 y 4000 millones de años, no quedaría más remedio que concluir que durante ese mismo período la Tierra experimentó más de 300 impactos comparables (es un blanco mayor, tanto por el área de su sección transversal como por su masa, así que tiende a recibir 20 veces más proyectiles). De éstos, entre 15 y 20 habrían sido monumentales, con cuencas de más de 2500 kilómetros de diámetro.

Las consecuencias de tales impactos serían espectaculares, afectando, entre otros aspectos, a la geología terrestre. Su magnitud alteraría cualquier patrón de convección que pudiera haber impulsado la tectónica de placas primitiva. Además, aflorarían rápidamente material caliente del manto. Al salir a la superficie, las rocas calientes se fundirían en el acto y se producirían grandes cantidades de magma.

Serían tiempos duros para la vida. Los acontecimientos más extraordinarios vaporizarían toda el agua líquida del planeta, lo que hace im-

probable que pudiese mantenerse en parte alguna, viéndose forzada a empezar de nuevo. Christopher F. Chyba apunta que hubo varios episodios de esterilización antes de que el ritmo de los impactos decayese hace unos 3800 millones de años. Sólo a partir de entonces pudo la vida arraigar en la Tierra. Hay, en efecto, importantes indicios de que los microorganismos aparecieron hace unos 3600 millones de años, es decir, sólo unos 200 millones de años después de que el bombardeo remitiese, un período razonable para que surjan organismos vivos.

También se ha recurrido a los grandes impactos para explicar las principales extinciones producidas sobre la Tierra. Esta hipótesis está bien documentada para el límite entre el Cretácico y el Terciario, hace 65 millones de años, cuando la mitad de las especies vivas, los dinosaurios entre ellas, hallaron su fin. Las dos series de indicios más importantes derivan del enriquecimiento global de iridio en ese período y de la presencia de formas de feldespato y cuarzo alteradas por choque. Los equipos dirigidos por Alan R. Hildebrand y Virgil L. "Buck" Sharpton han identificado el lugar del probable impacto. El cráter, el Chicxulub, que está totalmente cubierto por los sedimentos que forman la península del Yucatán, se descubrió en 1981. Es una estructura de 300 kilómetros de diámetro y de 65 millones de años de antigüedad.

Hay estudiosos que mantienen que tales extinciones en masa no son accidentes casuales, sino acontecimientos periódicamente recurrentes. No es posible demostrar esta hipótesis observando las formaciones terrestres, por las incertidumbres del registro fósil y porque el número de cráteres terrestres datados con precisión es demasiado pequeño. Pero sin un registro histórico correcto, es inútil buscar la periodicidad. Puede que las pruebas se encuentren en la superficie de la Luna, que está plagada de cráteres formados en los últimos 600 millones de años. Pero la determinación precisa de la edad requiere que se tomen muestras.

Para completar los datos que faltan sobre el origen y la historia primitiva de la Tierra, hemos de volver a la Luna. El problema del origen parece resuelto, pero los detalles sólo se han esbozado. No se ha probado de manera que satisfaga a todos la existencia de un océano de magma. Hemos de determinar la composición global de la Luna, lo que puede hacerse con rastreos espectroscópicos en órbita y estudios sismográficos de superficie. Con más muestras procedentes de lugares claves de las tierras altas lunares, podríamos descifrar los procesos que operan dentro de un complicado cuerpo magmático. La historia de los bombardeos de la Luna no se conocerá nunca sin muestras extraídas de depósitos de impacto identificables que estén dentro de cráteres. Además, las nuevas misiones no tendrían por qué ser tan caras y complejas como las Apolo, ya que podrían realizarse con sondas automáticas.

Pero si los Estados Unidos y el mundo llegasen a la conclusión de que no pueden costear el viaje a la Luna de una serie de misiones, orbitales y de superficie, nunca sabremos los detalles de la formación, fusión primitiva y bombardeo de la Luna y de la Tierra. Sólo si proseguimos el legado de los Apolo habrá esperanzas de que completemos el conocimiento de nuestra posición en el sistema solar.

Influencia del proyecto Apolo en la ciencia lunar

ASUNTO	OPINION PREVIA	OPINION ACTUAL
Origen	Capturada, derivada de la Tierra o formada con la Tierra como planeta dual	Impacto gigantesco sobre la Tierra, seguido por la formación de la Luna a partir de los residuos
Cráteres	La mayoría de impacto, algunos volcánicos	Casi todo de impacto; se determina la dinámica de los residuos proyectados
Presencia de sustancias volátiles	Desconocida, aunque algunos creían que el agua fluyó por la superficie lunar	No hay, aunque los impactos de cometas pueden haber aportado agua que estaría en lugares muy fríos de los polos
Edad de las rocas	Incierta, pero probablemente grande (unos cuantos miles de millones de años)	Zonas elevadas: la mayoría de las rocas, más de 4100 mill. de años; las anortositas, 4400 mill. Mares: algunos, los jóvenes, de unos dos mil millones de años; los otros, de hasta 4300 mill.
Océano de magma	Ni se había pensado en algo así	Las anortositas se forman a partir de él; otras rocas de las cordilleras, formadas a continuación
Composición de los mares	Desconocida	Gran variedad de tipos de basaltos
Composición de las cordilleras	Desconocida	Gran variedad de tipos de roca, todos con más aluminio que los basaltos de los mares
Composición del manto	Desconocida	Cantidades variables de olivino y piroxeno, sobre todo

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LUNAR SOURCE BOOK: A USER'S GUIDE TO THE MOON. Dirigido por Grant Heiken, David Vaniman y Bevan M. French. Cambridge University Press, 1991.

TO A ROCKY MOON: A GEOLOGIST'S HISTORY OF LUNAR EXPLORATION. Don E. Wilhelms. University of Arizona Press, 1993.

Moléculas sintéticas autorreplicantes

En los laboratorios se ensamblan moléculas que pueden hacer copias de sí mismas, "mutar", competir por los recursos y asociarse, proporcionando un paradigma de la vida

Julius Rebek, Jr.

Imaginemos una molécula que se sintiera atraída por su propia forma: cuando hallara una copia de sí misma, se adaptaría perfectamente a su gemela, formando temporalmente una entidad única. Si la molécula original se encontrara con trozos de sí misma, los juntaría todos formando copias o réplicas completas adicionales. El proceso continuaría mientras durara el suministro de componentes.

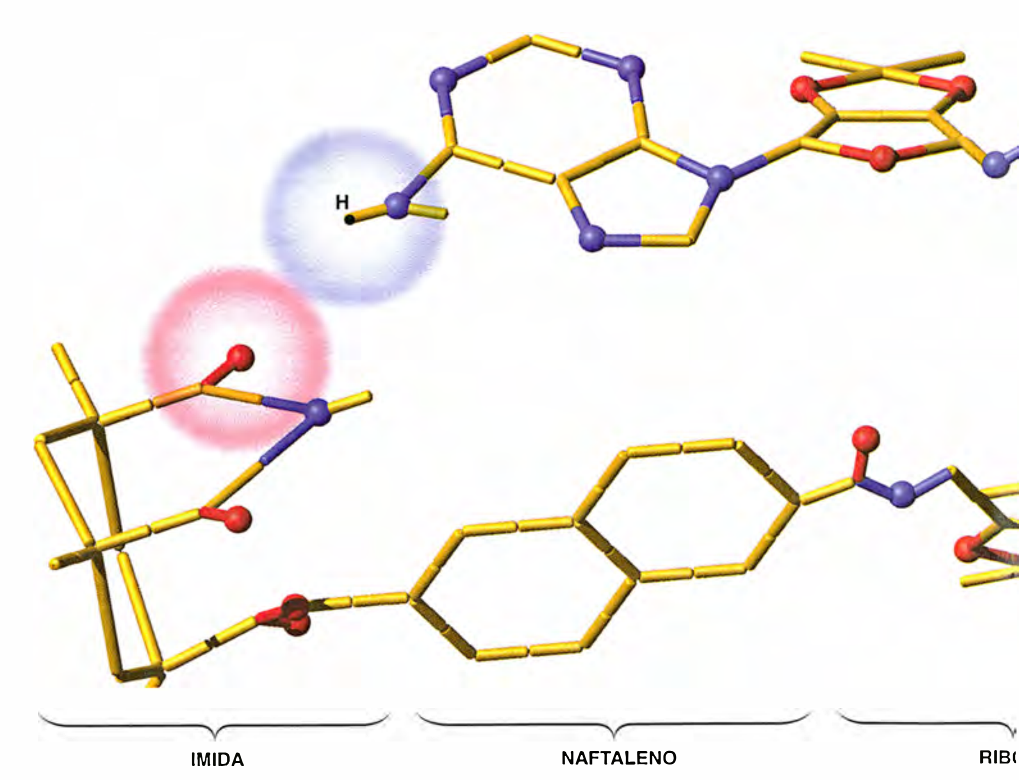
Junto a mis colegas del Instituto Tecnológico de Massachusetts, he diseñado moléculas autoasociantes como las mencionadas y las hemos preparado en el laboratorio. Nuestros esfuerzos tratan de ilustrar los caminos por los que pudo haberse iniciado la vida, lo que probablemente ocurrió cuando aparecieron moléculas capaces de reproducirse. Las moléculas orgánicas que preparamos pueden ayudarnos a elucidar algunos principios esenciales de la autorreplicación, aunque no forman parte de sistemas vivos.

Los intentos de imitar la vida son todavía muy recientes, si los comparamos con los inicios de la propia vida sobre la Tierra, hace tal vez tres mil quinientos millones de años. Nadie puede asegurar qué condiciones atmosféricas o terrestres existían entonces, ni cuál fue la primera molécula que traspasó la crítica frontera entre la química orgánica y la biología.

En 1953, Stanley L. Miller, por entonces en la Universidad de Chicago, realizó uno de los primeros intentos, y tal vez el primero, de recrear la transición. Consiguió formar aminoácidos partiendo de una mezcla de agua, metano, amoníaco e hidrógeno —sustancias que se supone estaban presentes en la atmósfera primigenia— tras aplicar una descarga eléctrica. El descubrimiento de la estructura del ADN por James D. Watson y Francis H. C. Crick, también en 1953, contribuyó a alimentar el interés del tema.

Hace algunas decenas de años que la receta más aceptada para generar vida se compone de ADN y ARN en agua templada, ni ácida ni alcalina, a lo que sólo hay que añadir algunos reactivos que se supone formaban parte de la primitiva atmósfera terrestre. En estas circunstancias tan restrictivas, los estudiosos de la química prebiótica, como Miller o Leslie E. Orgel, de la Universidad de California en San Diego, lograron resultados significativos en replicación molecular. De hecho, toneladas y toneladas de ADN se replican cada día en los seres vivos precisamente de esa forma, bajo la supervisión de una multitud de enzimas.

Sin embargo, datos recientes indican que la Tierra primitiva no era quizá tan hospitalaria como sugiere el paradigma de la "charca caliente" [*véase* "En el principio...", por John Horgan; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1991]. Estas sospechas, junto con el descubrimiento de organismos capaces de vivir a temperaturas que harían coagular literalmente la san-



1. ARNI, una molécula autocomplementaria (*abajo*), reúne a los componentes que necesita —una adenina-ribosa (*arriba izquierda*) y un naftaleno-imida (*arriba derecha*) —para replicarse. Las pequeñas esferas azules representan átomos de nitrógeno y las rojas, de oxígeno. Unos halos rodean los átomos que participan en enlaces de hidrógeno.

gre, o cerca de chimeneas volcánicas sulfurosas en el fondo de los océanos, han llevado a los científicos a sugerir que puede que la vida comenzase de forma muy distinta. Tal vez los únicos requisitos de las moléculas que se transformaron en vida fueran los señalados en dos extraordinarios libros de Richard Dawkins *El relojero ciego* y *El gen egoísta*. Aunque escritos hace quince años, los croquis de Dawkins anticipan de modo sorprendente los resultados de mi propio trabajo sobre autorreplicación de los últimos cuatro años.

JULIUS REBEK, JR. nació en Hungría en 1944. Tras vivir en Austria de 1945 a 1949, su familia se estableció en Kansas. Rebek se graduó por la Universidad de Kansas y se doctoró por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), trabajando con Daniel S. Kemp en química de péptidos. Como profesor adjunto de la Universidad de California en Los Angeles, desarrolló el ensayo de las tres fases para la detección de intermedios reactivos. En 1976 se trasladó a la Universidad de Pittsburgh y en 1989 regresó al MIT, donde ocupa la cátedra Camille Dreyfus de química. Es becario de la Academia Americana de Artes y Ciencias y acaba de ser elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias.

Las moléculas, naturales o sintéticas, son capaces de replicarse cuando sus formas y su estructura química poseen una propiedad denominada complementariedad. Según cómo ocupe el espacio y de qué forma sus átomos o grupos de átomos atractores se encuentren distribuidos por sus brazos, una molécula encajará mejor o peor entre las grietas y recovecos de otra. La "calidad del encaje" entre ambas moléculas complementarias depende, por tanto, no sólo de su estructura espacial sino también de los distintos tipos de enlaces químicos que las mantienen juntas en forma de grupos. Dichos grupos, o "complejos", se forman y se separan rápidamente en microsegundos o nanosegundos, tiempos muy cortos, pero suficientes para que tengan lugar reacciones químicas.

Las fuerzas que mantienen unidos a los complejos son varias veces más débiles que las de los enlaces covalentes que unen los átomos en forma de moléculas. Un tipo de fuerza atractiva que es importante en los complejos es el llamado enlace de hidrógeno, que se forma cuando un átomo de hidrógeno con una carga parcial positiva se acerca, por ejemplo, a un átomo de oxígeno que contiene una carga parcial negativa. En general, las atracciones de este tipo se denominan interacciones polares.

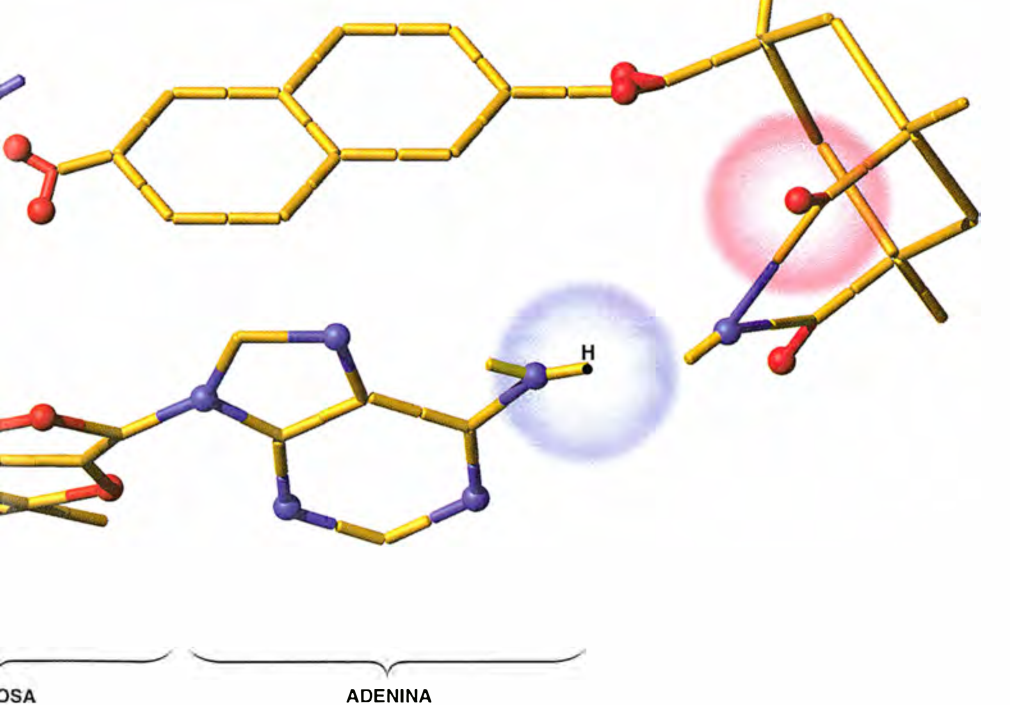
Otro tipo de fuerza, la de van der Waals, es más sutil: los electrones de una molécula pueden empujar a los de otra, creando un desequilibrio de carga que da lugar a una atracción. Por último, existe un tercer tipo de atracción, el denominado "apilamiento aromático", una disposición que adoptan a veces las moléculas orgánicas planas (que a menudo poseen fragancia, de ahí el nombre de aromáticas) cuando no tienen afinidad por el disolvente que las rodea. Al apilarse unas sobre otras, superficie plana sobre superficie plana, expulsan la mayor parte del disolvente que se encuentra entre ellas, alcanzando una configuración más estable.

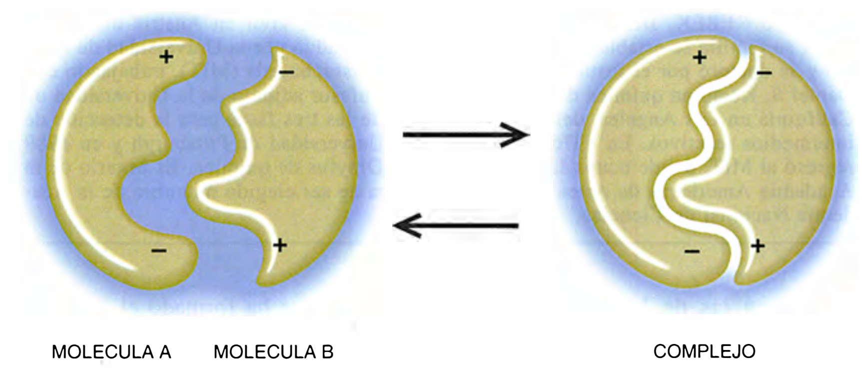
Una vez se ha formado el complejo, las superficies moleculares encajadas entre sí se encuentran relativamente protegidas. Los disolventes destructivos, los ácidos disueltos, las bases o los agentes oxidantes no pueden llegar hasta ellas. Entonces, las partes complementarias tienen tiempo de unirse entre sí de forma permanente mediante enlaces covalentes. A veces, se enlazan dos de las tres moléculas presentes en un complejo. La tercera sirve únicamente para facilitar el proceso.

Un acoplamiento así da lugar a un esquema de replicación clásico, el empleado por el ADN, del que puede darse una sencilla descripción mediante formas cóncavas y convexas. Una superficie molecular cóncava —recubierta de átomos atractores apropiados— puede reconocer y rodear a su complemento convexo. Asimismo, podrá actuar como un molde para formar la molécula convexa a partir de sus componentes. A su vez, la molécula convexa podrá hacer de plantilla para juntar y fusionar las partes constitutivas de la molécula cóncava. Ambos procesos de replicación, por los que cada molécula forma la otra, constituyen lo que podríamos denominar un biciclo [*véase la figura 3*]. Nuestros experimentos más recientes indican que un biciclo puede llegar a ser muy eficaz.

Existe un paradigma de replicación alternativo: dos moléculas complementarias de un complejo pueden enlazarse por algún lugar que no se encuentre sobre la superficie de reconocimiento. Formarán una molécula única, en la cual un extremo será complementario del otro y el conjunto complementario de sí mismo [*véase la figura 5*]. Las superficies de reconocimiento situadas a los extremos de la nueva molécula autocomplementaria siguen siendo accesibles a otras moléculas. Cada uno de los extremos podrá fijar un fragmento idéntico al del otro extremo.

Una vez fijados, los dos nuevos componentes no pueden ya moverse libremente y se trasladarán juntos a través del espacio; la probabilidad de que acaben enlazándose entre sí se incrementa mucho. Así pues, la enti-





2. EL RECONOCIMIENTO MOLECULAR tiene lugar cuando dos fragmentos de propiedades geométricas y químicas complementarias forman un complejo. Los signos + y — indican atracciones electrostáticas. Por otra parte, el disolvente situado entre las moléculas es expulsado, lo que contribuye a estabilizar el complejo de vida corta.

dad autocomplementaria fabrica una copia de sí misma, y muchas otras por un proceso similar. No se necesitan enzimas: la molécula cataliza su propia formación.

Un método así es el que hemos empleado en el laboratorio para generar moléculas capaces de reaccionar unas con otras por caminos reminiscentes de los de la vida. Algunas de ellas se asemejan a ciertos materiales genéticos y, en concreto, a los componentes de los ácidos nucleicos denominados adeninas. Las adeninas son planas; por los bordes, contienen átomos de hidrógeno y de nitrógeno que pueden formar enlaces de hidrógeno con los átomos de oxígeno y de hidrógeno de sus moléculas complementarias, denominadas imidas. Desarrollamos nuestras imidas a partir de una molécula que contiene una especie de joroba, el triácido de Kemp, cuyo esqueleto curvado permite obtener fácilmente estructuras cóncavas de grandes dimensiones. De esta forma se consigue una zona de enlaces de hidrógeno unida en curva, como un gancho, a una superficie aromática capaz de generar apilamiento; ambas zonas encajan perfectamente con la zona de enlaces de hidrógeno y con la superficie plana de la adenina.

Tras asociarse en forma de complejo, la adenina y la imida pueden unirse covalentemente, generando una molécula autocomplementaria. Nuestros primeros intentos de obtener autorreplicación a partir de esta estructura fueron frustrados por su imprevista flexibilidad. Si bien cierta flexibilidad es beneficiosa para el reconocimiento molecular —es más fácil calzarse una bota de cuero que otra de madera—, el exceso puede dificultar considerablemente el ajuste, como si tratáramos de ponernos un calcetín sin utilizar las manos.

Las moléculas se tornan flexibles si contienen enlaces sencillos, con sólo un par de electrones en cada uno. Tales enlaces permiten que las partes que unen giren libremente entre sí, generando múltiples formas. Cuando mi estudiante graduado Tjama Tjivikua, procedente de Namibia, unió la adenina con la imida mediante enlaces covalentes sencillos, tuvo que trabajar con una cadena de átomos de carbono. La cadena era tan larga y flexible que la estructura autocomplementaria resultante se doblaba sobre sí misma como una navaja al cerrarse. La adenina se asociaba a su propia imida tan confortablemente que la molécula, plenamente satisfecha, no mostraba ningún interés en asociarse con otras moléculas ni en replicarse.

Afortunadamente, esta situación era subsanable. El remedio consistía en insertar una molécula mayor y más rígida en lugar de la simple cadena, para evitar el plegado. Nuestra elección fue una superficie plana grande, un naftaleno, flanqueado por una ribosa cíclica que permitía una unión menos flexible con ambos componentes.

La nueva molécula en forma de J, adenina-ribosa-naftaleno-imida (abreviadamente ARNI), nos proporcionó nuestro primer ejemplo de replicación. Empleando cromatografía líquida de alta eficacia, que permite detectar pequeños cambios en las concentraciones de reactivos, Tjivikua y Pablo Ballester, un visitante posdoctoral de Mallorca, lograron el resultado. Compararon la velocidad de formación de ARNI en una solución que contenía únicamente sus componentes, con la velocidad de formación cuando se añadía algo de ARNI. La presencia de ARNI incrementó la velocidad de formación, clara muestra de que nos encontramos ante un sistema autorreplicante.

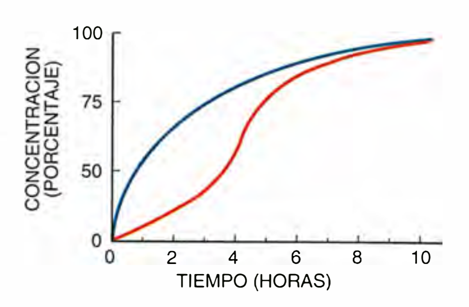
Si se representa la variación de una reacción con respecto al tiempo, se obtiene generalmente una curva de forma parabólica. El producto se forma más aprisa al principio, cuando los reactivos se encuentran en su máxima concentración, y la velocidad de formación va decreciendo a medida que se van consumiendo. En una reacción autocatalítica —es decir, aquella en la que el producto, como nuestro ARNI, cataliza su propia formación— la curva debería presentar una forma de S, o "sigmoide" [*véase la figura 4*]. La reacción comienza lentamente y, a medida que el producto se va formando y empieza a actuar como catalizador, se acelera, con lo que la curva se inclina hacia arriba. Finalmente, cuando los reactivos se van consumiendo, la reacción se hace más lenta, hasta pararse.

3. UN BICICLO DE REPLICACION requiere dos moléculas de formas complementarias, representadas por el bloque A y la caja B, en la que encaja. En el ciclo de la izquierda, el bloque (*centro*) reúne las dos partes de la caja (*abajo*) para formar un complejo (*izquierda*); las dos partes reaccionan entonces para formar una caja completa (*arriba*). El bloque y la caja se disocian rápidamente. En el ciclo de la derecha, es la caja la que reúne los fragmentos del bloque. Así pues, ambas moléculas complementarias catalizan su mutua formación.

El grado de curvatura sigmoidea depende de varios factores, de los que el más importante es la eficacia de la etapa autocatalítica. Si la reacción de fondo —la que se produce por combinación de los reactivos por sí solos, sin ayuda de la molécula autorreplicante— es muy rápida, puede ocluir la señal indicadora del proceso autorreplicante. En 1990 Günter von Kiedrowski y sus colaboradores de la Universidad de Gotinga demostraron que un ácido nucleico autorreplicante podía mostrar un crecimiento sigmoideo como el descrito, probando que la síntesis autocatalizada es en este caso más eficaz que la aleatoria.

Aunque ARNI no mostró crecimiento sigmoideo, nuestro siguiente ensayo, ARBI, sí lo hizo. Disminuimos la velocidad de la reacción de fondo colocando sobre ARBI un elemento central para el apilamiento ligeramente más largo, un bifenilo en vez de un naftaleno. Teníamos ahora pruebas de estar en posesión de una auténtica molécula autorreplicante sintética.

¿Está viva? No, según las definiciones más al uso. Nuestros críticos (los críticos de la molécula) se apresuraron a decir que, como forma de vida, ARBI presentaba serias limitaciones, pues sólo era capaz de hacer copias de sí misma. Para ser susceptible de evolución, una molécula autorreplicante tiene que poder "cometer errores": de vez en cuando debería sintetizar otras moléculas, que tal vez pudieran ser mejores replicantes. A diferencia de los críticos musicales o de arte, los críticos científicos suelen indicar al menos en qué dirección deberían ir las mejoras. Respondimos diseñando moléculas capaces de cometer errores; es más, incapaces de no cometerlos.



4. UNA CURVA EN S (*en rojo*) es típica de una reacción autocatalítica, si representamos la concentración del producto de reacción en función del tiempo. Al principio, la molécula se forma lentamente. En cuanto cataliza su propia síntesis, el proceso se acelera bruscamente, para hacerse más lento de nuevo conforme los reactivos se van consumiendo. Las reacciones corrientes (*en azul*) muestran una sencilla trayectoria parabólica.

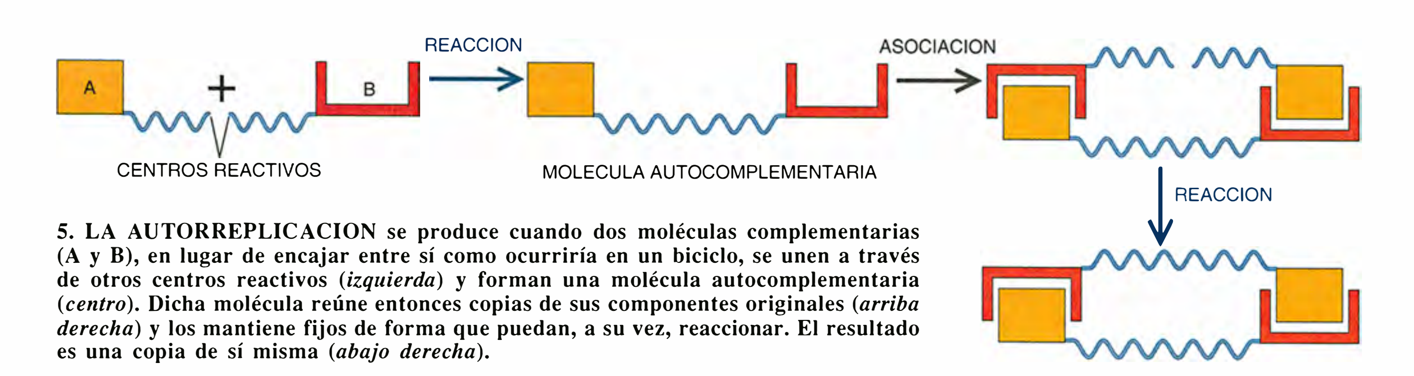
En química orgánica se produce un "error" cuando existe falta de selectividad entre los componentes de una reacción. Necesitábamos una molécula que fuera capaz de catalizar, no sólo su propia formación, sino también la de otra molécula de aspecto parecido. Además, al menos una de las dos debería ser capaz de generar un replicante más eficaz.

Es fácil manipular una molécula para que haga copias de un competidor. Dotarla de capacidad de "evolucionar" cuesta más trabajo. En nuestra búsqueda de soluciones, volvimos a ocuparnos de algunos datos previos sobre las zonas de enlaces de hidrógeno de la adenina. Existen dos formas de unir una imida a una adenina. Se puede situar la imida en el borde Watson-Crick de la adenina, el mismo que participa en la replicación del ADN, o por el contrario colocarla en el borde Hoogsteen, una región del ADN normalmente abierta hacia el exterior (aunque en algunos casos se enlaza también en forma de exóticas triples hélices).

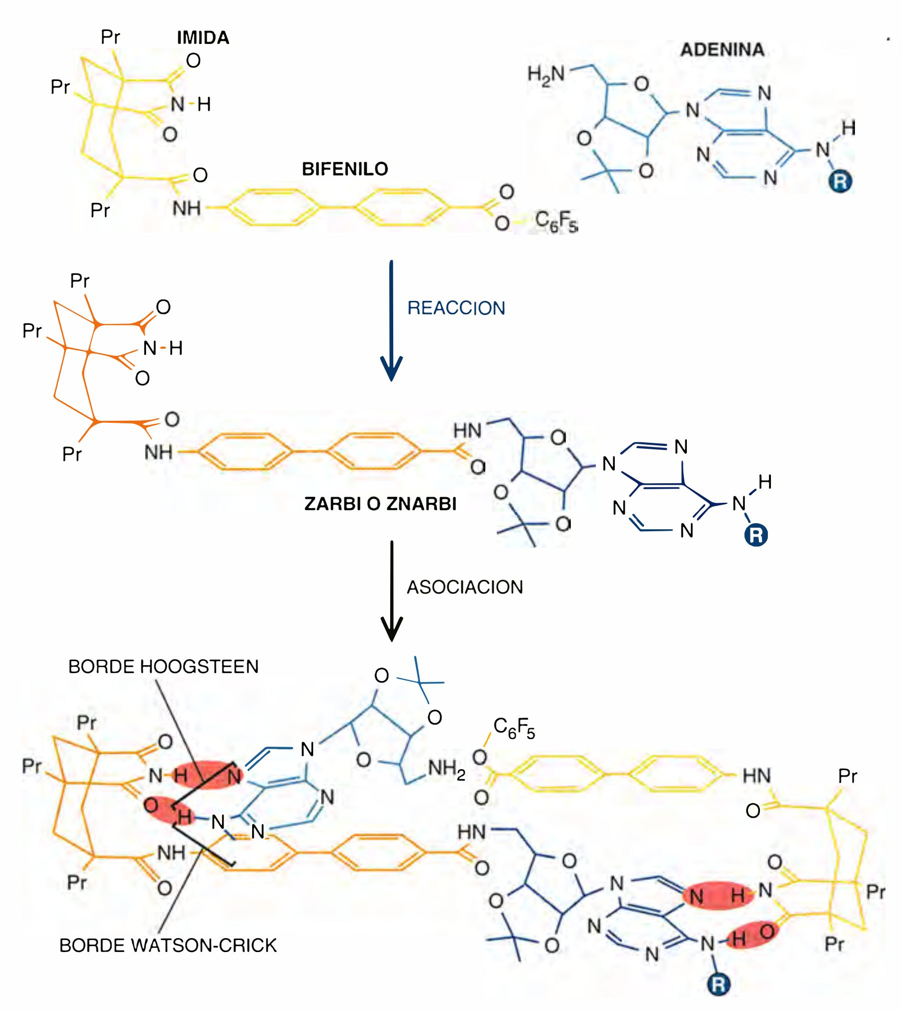
Habíamos demostrado ya que las adeninas simples se podían unir a nuestras imidas por ambos bordes. Así pues, se obtienen proporciones aproximadamente iguales de complejos Watson-Crick y Hoogsteen con imidas unidas a superficies de naftaleno. Pero si uno de los hidrógenos del grupo amino (NH_2) de la adenina, que participa en los enlaces de hidrógeno, se reemplaza por un grupo más voluminoso, la situación cambia. El nuevo grupo se sitúa de forma que el acceso al borde tipo Watson-Crick queda bloqueado, dejando libre el borde Hoogsteen. Por ejemplo, con un simple grupo metilo sobre la adenina, más del 85 por ciento de nuestros receptores sintéticos de imida se colocan sobre el borde Hoogsteen.

Decidimos explotar los cambios en la velocidad de replicación que resultan de bloquear el borde Watson-Crick. Para ello, preparamos dos adeninas distintas, una con un grupo benciloxicarbonilo, también llamado "Z" (un conocido grupo protector en síntesis de proteínas), y otro con un grupo Z que llevaba un nitrógeno adicional: Z-NO_2. El plan era el siguiente: una adenina alterada y la imida se unirían al compuesto molde como antes, pero los grupos bloqueantes quedarían colgando en zonas muy alejadas del punto de formación del nuevo enlace covalente. El grupo Z de un extremo no podría saber si en el otro lado había un Z o un Z-NO_2, y la síntesis tendría lugar con independencia de cuáles fueran los grupos protectores.

Por otra parte, el bloqueo del borde de Watson-Crick limitaría la formación de enlaces de hidrógeno al borde Hoogsteen. Así pues, los replicantes modificados ZARBI y ZNARBI —hechos a partir de adeninas con grupos Z o Z-NO_2, respectivamente— deberían replicarse más lentamente. Aquí, la elección de los grupos protectores resulta crítica. Si bien muchos protectores conducen a replicantes que cometen errores, el grupo nitro (NO_2) es algo especial. Los investigadores saben desde hace más de treinta años que este grupo se puede eliminar fácilmente por irradiación con luz ultravioleta de longitud de onda adecuada. Una vez se ha escindido el grupo Z-NO_2, el borde Watson-Crick queda liberado. La nueva molécula, más ligera, sería capaz de encajar de nuevo por dicho borde además de por el lado Hoogs-



5. LA AUTORREPLICACION se produce cuando dos moléculas complementarias (A y B), en lugar de encajar entre sí como ocurriría en un biciclo, se unen a través de otros centros reactivos (*izquierda*) y forman una molécula autocomplementaria (*centro*). Dicha molécula reúne entonces copias de sus componentes originales (*arriba derecha*) y los mantiene fijos de forma que puedan, a su vez, reaccionar. El resultado es una copia de sí misma (*abajo derecha*).



6. "MOLECULAS MUTANTES" que se producen cuando una adenina con un grupo adicional R se une con una bifenil-imida para formar una molécula autocomplementaria. El grupo R puede ser un grupo Z (benciloxicarbonilo) o uno Z-NO_2, dando lugar a una molécula ZARBI o ZNARBI, respectivamente. Esta última puede engancharse con una adenina por el borde Hoogsteen (el grupo R bloquea el borde Watson-Crick) y unirla a una bifenil-imida, catalizando su propia formación y también la de su competidor. Los óvalos rojos representan enlaces de hidrógeno.

teen, quedando dotada según esperábamos del doble de eficacia que las moléculas de las que procedía.

Sometimos a nuestras adeninas con grupos Z o Z-NO_2 a las pruebas de autorreplicación ya establecidas. Cuando se unieron a los receptores de bifenilo para producir ZARBI y ZNARBI, las nuevas moléculas seguían comportándose como replicantes, si bien hay que reconocer que de forma no muy eficaz. Los replicantes compensaban su torpeza con su capacidad de cometer errores. ZARBI sería capaz de catalizar su propia formación, así como de actuar como plantilla para albergar a su rival ZNARBI. Este último, recíprocamente, catalizaría su propia formación, y también la de ZARBI.

Ahora nos enfrentábamos al desafío de demostrar una versión química de una mutación, es decir, un cambio estructural permanente y heredable que afecta a la capacidad de supervivencia de un organismo o, en nuestro caso, a su análogo, una molécula autorreplicante. Los cambios en la estructura de un replicante molecular podrían ser causados por variaciones de temperatura, acidez, salinidad o por muchos otros factores. Nosotros elegimos la irradiación luminosa.

Colocamos en primer lugar a ZARBI y a ZNARBI en competición directa por los recursos necesarios para su reproducción. Qing Feng, por entonces en mi grupo como estudiante graduado, y Jong-In Hong, un colaborador posdoctoral, dejaron competir dos derivados de adenina con grupos Z y Z-NO_2 frente a una cantidad limitada del receptor complementario con bifenilo. ZNARBI demostró que era un replicante algo mejor. Cuando se había gastado todo el receptor, irradiamos el matraz de reacción con luz ultravioleta de 350 nanómetros de longitud de onda. Tras unas horas de irradiación, todos los grupos Z-NO_2 habían sido eliminados, tanto de los replicantes ZNARBI como de sus adeninas progenitoras. Es decir, todas las moléculas ZNARBI se habían transformado en ARBIs y las adeninas con Z-NO_2 en adeninas normales. Había tenido lugar una "mutación", promovida por un cambio en el entorno. Tanto ZARBI como las Z-adeninas permanecían inalteradas.

A continuación añadimos más receptor bifenilo. ZARBI se encontró con el producto de irradiación, ARBI, como su competidor. El brillante ARBI, con la ventaja adicional de poder replicarse tanto por el modo Hoogsteen como por el Watson-Crick, rápidamente se hizo con los recursos del sistema.

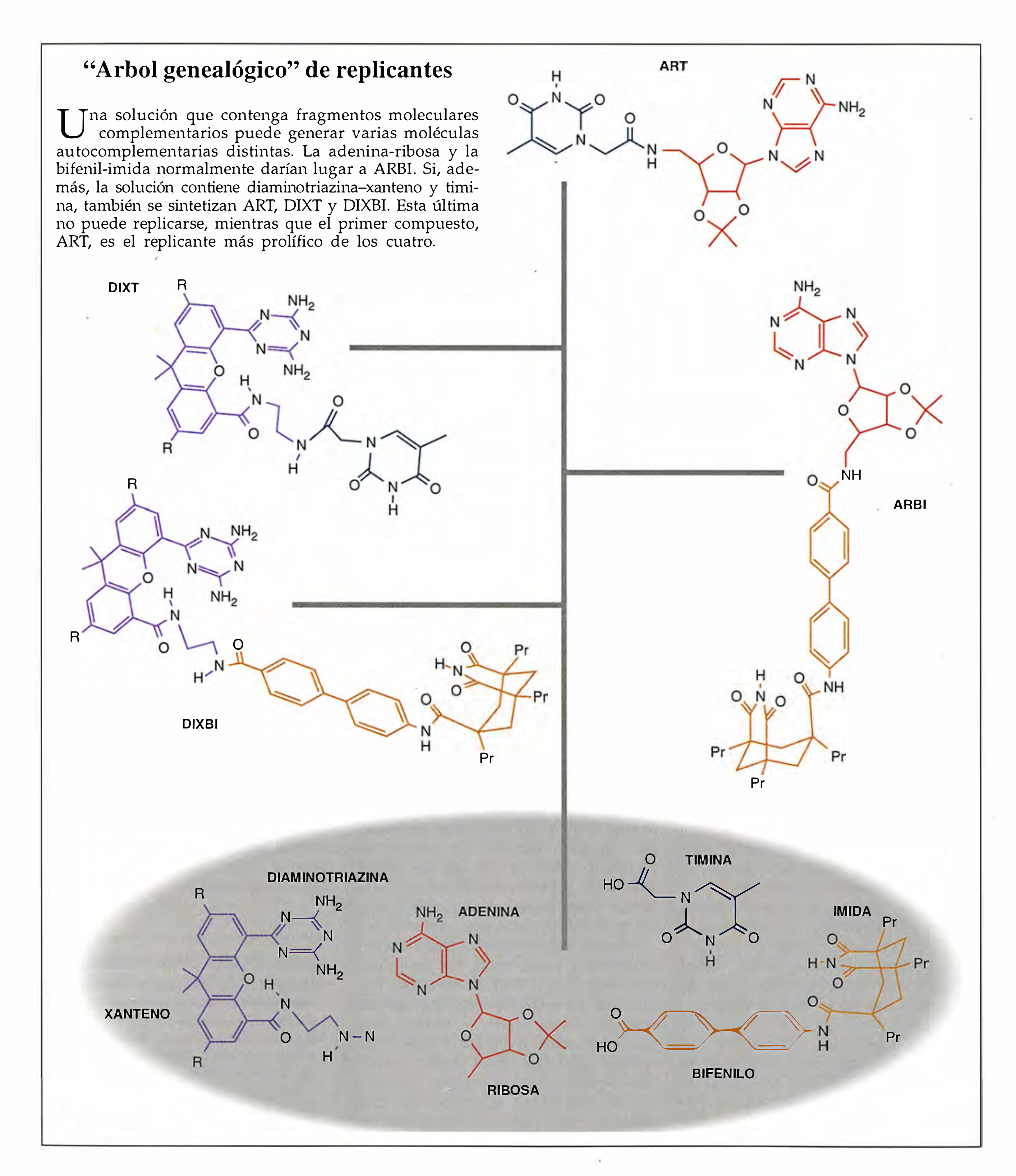
Podemos realizar una sencilla interpretación evolucionista de este experimento. Pensemos que en la secuencia anterior ARBI fuera el sistema original; su replicación requeriría la presencia de Z-adenina y de receptor bifenilo. Si se añade ácido nítrico, algunas de las Z-adeninas se consumirían para transformarse en adeninas Z-NO_2, que darían lugar a ZNARBIs. ZNARBI es un mejor replicante que su antepasado ZARBI. Al irradiar el sistema, se produciría un segundo cambio y ZNARBI se convertiría en el más sencillo y eficaz ARBI, el mejor replicante de los tres.

Aunque se considera que la mutación es la fuerza motriz de los procesos evolutivos, otro importante paradigma del cambio es la recombinación. Dos cromosomas pueden escindirse, intercambiar hebras de ADN y juntarse de nuevo, combinando así sus características. Del mismo modo, algunos programas de ordenador pretenden "enseñar" a algunas secuencias o líneas de información cómo resolver un problema. Si se permite que las líneas se escindan y recombinen aleatoriamente, en poco tiempo dan lugar a sistemas que resuelven mejor el problema. La mutación permite cambios sencillos, pequeños; la recombinación, por el contrario, permite la creación de híbridos que son muy distintos de sus progenitores.

Nuestro interés por demostrar la recombinación a nivel molecular nos llevó a desarrollar un grupo completamente nuevo de moléculas autorreplicantes. El principio era el mismo: dos moléculas complementarias se unían mediante un enlace covalente, dando lugar a una única especie autocomplementaria que podría ayudar a su propia síntesis. Feng y otro estudiante, Tae Kwo Park, diseñaron un

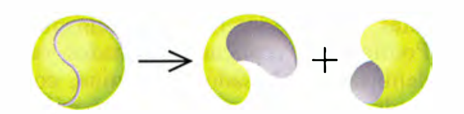
sistema replicante basado en otro componente de los ácidos nucleicos, la timina. Anteriormente, Park había desarrollado un receptor sintético que podía reconocer el núcleo de imida de la timina y al mismo tiempo colocarse sobre su superficie plana aromática. El receptor poseía un esqueleto molecular en forma de U. La parte baja de la U era un puente amplio y rígido conocido como xanteno; uno de sus brazos contenía una amina y el otro una diaminotriazina, el receptor de la timina. Uniendo la timina con el receptor mediante un enlace covalente, se generó una unidad autocomplementaria, denominada diaminotriazina-xanteno-timina, o DIXT. Fuimos capaces de demostrar que DIXT era también autorreplicante.

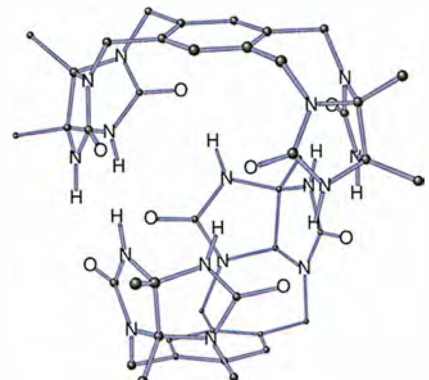
Estábamos en condiciones de intentar un experimento recombinante. ¿Podrían los replicantes basados en adenina y los basados en timina, colocados en el mismo matraz, barajar sus componentes dando lugar a nuevas combinaciones? Así ocurrió, en efecto. No obstante, quedamos sorprendidos por los resultados. Uno de los nuevos recombinantes, ART (adenina-ribosa-

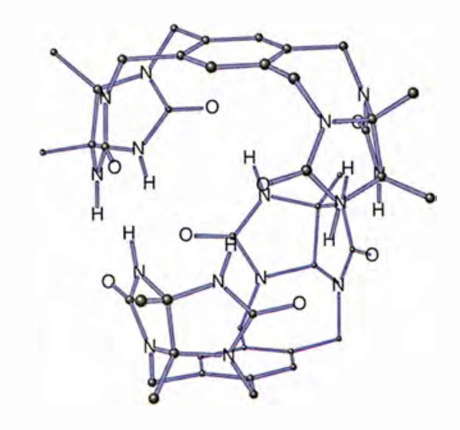


“Arbol genealógico” de replicantes

Una solución que contenga fragmentos moleculares complementarios puede generar varias moléculas autocomplementarias distintas. La adenina-ribosa y la bifenil-imida normalmente darían lugar a ARBI. Si, además, la solución contiene diaminotriazina–xanteno y timina, también se sintetizan ART, DIXT y DIXBI. Esta última no puede replicarse, mientras que el primer compuesto, ART, es el replicante más prolífico de los cuatro.







7. UNA PELOTA DE TENIS, cortada en dos por la costura, da lugar a dos superficies curvadas autocomplementarias que son la fuente de inspiración para el diseño de una pared celular. A la derecha se representa una molécula que puede unirse con su gemela formando una esfera hueca. Las imágenes son estereoscópicas. Si logra usted fijar la vista de modo que se superpongan, podrá ver la molécula en relieve.

timina), resultó ser el replicante más prolífico de todos, mientras que el otro, DIXBI (diaminotriazina-xanteno-bifenilo-imida), fue totalmente incapaz de replicarse: era "estéril".

¿De dónde procedía esta diferencia en la capacidad de replicación? La eficacia del replicante ART es fácil de explicar. ART se parece mucho a un fragmento de ADN, posiblemente el mejor replicante que existe. Además, el fragmento central de ribosa hace que las superficies de contacto se coloquen paralelas entre sí, en una configuración muy favorable. Esto, unido a la gran afinidad de la adenina hacia su complemento timina, da lugar a un complejo fácil de formar, que es la etapa intermedia de la replicación.

La ineficacia de DIXBI también puede achacarse a su forma molecular global. Está compuesto por dos moléculas en forma de U conectadas a través de un separador rígido de bifenilo; su estructura global puede adoptar una forma de C o de S. En el primer caso, las superficies de reconocimiento se encuentran situadas en el interior, sin espacio suficiente para que se forme un complejo replicante. Cuando adopta la forma de S, las superficies de reconocimiento se encuentran muy alejadas, de modo que, al generarse el complejo, la separación de ambas partes reactivas es demasiado grande y no se origina un enlace covalente. Por tanto, aunque DIXBI es autocomplementario, no puede producir replicación.

Mediante este experimento fuimos capaces de demostrar que un conjunto relativamente pequeño de componentes puede dar lugar a un "árbol genealógico" de replicantes. Tres de ellos son eficaces en autorreplicación, pero una rama del árbol se extingue. Llevando la analogía aún más lejos, lo apropiado sería que la molécula estéril fuera troceada en piezas que los replicantes activos pudieran emplear para sí mismos. Hemos dado algunos pasos en esta dirección. Para lograrlo es necesario equipar a nuestras moléculas con ácidos y bases capaces de actuar sobre otras moléculas de forma más activa que como lo hace el simple reconocimiento molecular.

Aunque ha sido muy satisfactorio estudiar la replicación, e incluso la evolución con moléculas sintéticas, nos hemos planteado cuál sería la siguiente etapa en el intento de expresar la vida como una serie de reacciones moleculares. Sospechamos, al igual que otros autores, que un atributo clave de la vida es que exista una frontera: un contenedor o pared celular, que separe el interior del exterior, impidiendo que las moléculas útiles se escapen, y manteniendo fuera las no deseadas.

Inspirados por la estructura de una membrana natural, hemos franqueado algunas pequeñas etapas iniciales hacia ese objetivo. Los virus emplean un caparazón proteico como contenedor; el caparazón está constituido por multitud de copias idénticas de una unidad de proteína sencilla. Las unidades también son autocomplementarias, pero sus superficies de reconocimiento están orientadas de tal modo que se asocian automáticamente en forma de caparazón cerrado. De hecho, ya Crick predijo que el recubrimiento vírico debería estar formado por un gran número de copias de proteínas idénticas, ya que no existe suficiente información en el genoma vírico como para que pudieran participar muchas moléculas diferentes.

Cuando empleamos la autocomplementaridad como guía, un prototipo de diseño nos llamó la atención, basado en la estructura de una pelota de tenis. Cortada por la costura, una pelota de tenis da lugar a dos fragmentos idénticos. René Wyler, un visitante posdoctoral procedente de Suiza, ha sintetizado recientemente una estructura que imita la forma de los fragmentos de una pelota de tenis, pero añadiendo complementariedad química. Las dos piezas encajan entre sí mediante enlaces de hidrógeno situados a lo largo de la costura.

Tenemos buenas razones para asegurar que una molécula pequeña, como la del disolvente cloroformo, cabe en el interior de nuestra molécula de tenis. Sin embargo, la cavidad es demasiado pequeña para acomodar a ninguno de nuestros replicantes, incluso a los más pequeños. Actualmente estamos desarrollando, en colaboración con Javier de Mendoza y su grupo de la Universidad Autónoma de Madrid, una molécula mucho mayor, como un balón elástico, cuyo interior sea de tamaño suficiente para albergar a alguno de nuestros sistemas replicantes.

Cuando hayamos resuelto el problema del contenedor, los principales obstáculos a superar en nuestra agenda sobre vida molecular serán responder a las siguientes preguntas: ¿Cómo puede conseguir energía nuestra novata criatura? ¿La obtendrá del sol o de otras moléculas? ¿Cómo pueden reponerse las piezas constitutivas de nuestros replicantes y de sus contenedores? Estos son algunos de los desafíos y objetivos para los próximos diez años. Se alcancen o no, los esfuerzos de los químicos para responder a las cuestiones anteriores aportarán sin duda nueva luz sobre la química orgánica de la vida, sobre cómo se inició la vida y cómo continúa floreciendo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHEMICAL EVOLUTION: ORIGIN OF THE ELEMENTS, MOLECULES, AND LIVING SYSTEMS. Stephen F. Mason. Clarendon Press, 1991.

MOLECULAR REPLICATION. Leslie Orgel en *Nature*, vol. 358, n.º 6383, págs. 203-209; 16 de julio de 1992.

A TEMPLATE FOR LIFE. Julius Rebek en *Chemistry in Britain*, vol. 30, n.º 4, páginas 286-290; abril de 1994.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Perfiles

John Horgan

ANDRÉ WEIL: *El último matemático universal*

En 1939, un matemático francés que a la sazón contaba 33 años demostró la corrección de una conjetura relativa al comportamiento de la tortuosa andadura de los números primos hacia el infinito, en cierto número de casos particulares de crucial importancia. Tal logro, a saber, la demostración de la hipótesis de Riemann para la función Z en el caso de funciones de un cuerpo, constituye una joya de la teoría de números moderna. La hazaña es tanto más notable cuanto que su autor la consiguió estando encarcelado en una prisión militar francesa.

La anécdota anterior es sólo una de las muchas cosas extraordinarias acontecidas a André Weil a lo largo de su vida. Una vez recuperada la libertad, Weil llegaría a convertirse en uno de los más insignes matemáticos de este siglo. Pero tan aisladas están las matemáticas de las restantes formas de cultura que el hoy profesor emérito del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, es casi completamente desconocido fuera del mundillo matemático. Cuando hace tres años se publicó su autobiografía, titulada *The Apprenticeship of a Mathematician*, no hubo una sola publicación extramatemática que la reseñara.

Los colegas de Weil están prestos a ensalzarle, llamándole "el último de los grandes matemáticos universales". Destacan que fue uno de los fundadores de Bourbaki, el grupo legendario que, cobijado bajo el nombre de un sabio ficticio —Nicolas Bourbaki—, ha escrito una serie de monumentales tratados que han aportado unidad y orden a las matemáticas. El propio Weil ha navegado por todos los tributarios principales de las matemáticas, sobre todo la teoría de números, la geometría algebraica y la topología, erigiendo demostraciones y conjeturas que, a modo de diques, canalizaron el curso de ulteriores indagaciones.

El estilo de Weil ha ejercido tanta influencia como sus aportaciones concretas. Un especialista en teoría de números le asimila a un monje medieval, que labora con "una sencillez y pureza tremendas, sin ornatos superfluos". Weil siempre ha ido en pos de lo esencial, confirma otro. Se dice que se le temía tanto por lo acerado de su lengua como se le admiraba por su brillantez. Un compatriota, que le compara con un violín de cuerdas demasiado tensas, recuerda que "no soportaba a los tontos" y piensa que tal vez los años le hayan ablandado.

André Weil: "Siempre en pos de lo esencial."

Weil cuenta actualmente 88 años; necesita audífono y tiene reconstruidas en plástico las articulaciones de las caderas. Durante la entrevista hay ocasiones en que casi parece apacible. Al preguntarle si le molestaba que fueran tan pocos quienes conocen su trabajo y menos todavía quienes pueden comprenderlo, responde, encogiéndose de hombros, "¿Por qué habría de molestarme? En cierto sentido, así resulta más apasionante todavía".

A diferencia de algunos puristas modernos, no le preocupa la creciente colaboración entre las matemáticas y la física (acicateada en parte por Edward Witten, físico teórico cuyo despacho está frente al suyo). "He vivido una época en la que la física no era importante en matemáticas", comenta, "pero ahora volvemos a otra en la que creo que vuelve a serlo, lo cual es un fenómeno perfectamente saludable."

Hay, empero, destellos de acritud. Al pedirle su opinión sobre el asalto de Wiles al último teorema de Fermat, Weil empieza por decir, en broma, que dentro de algunos siglos los historiadores pensarán que Wiles y él son una misma persona (por la homofonía de sus nombres y apellidos). La sonrisa se le borra entonces de los labios, y añade "Admito que [Wiles] ha tenido buenas ideas al tratar de construir la demostración, pero todavía no hay demostración. Hasta cierto punto, demostrar el teorema de Fermat es como escalar el Everest. Si alguien se propone esca-

lar el Everest y se queda a cien metros de la cima, no ha escalado el Everest."

Al explicar por qué su autobiografía solamente se ocupa de su vida durante la segunda guerra mundial, Weil nos da otra respuesta acerada. "No había nada que contar de mi vida posterior", declara. "Algunos de mis colegas han escrito lo que llaman autobiografías, muy aburridas a mi parecer. Todo lo que cuentan consiste en decir 'en el año tal y tal fui nombrado en tal y tal institución, y en tal año demostré este o aquel teorema'."

Puede decirse que la vida de Weil, al menos en su primera mitad, casi estuvo demasiado cargada de acontecimientos. Nació en París en 1906. Tanto su padre, médico, como su madre se consagraron a la cultura en todos sus aspectos. Hacia los trece o catorce años, Weil había adquirido una "apasionada adicción" por las matemáticas. Se graduó en la Universidad de París en 1928, tras haber resuelto en su tesis doctoral un problema sobre curvas elípticas propuesto por Henri Poincaré, que estaba pendiente desde hacía 25 años.

Algunos años antes Weil había abjurado de la filosofía, tras haber recibido una elevada calificación en un examen a pesar de no haber leído ninguno de los textos necesarios. "Me pareció que una materia en la que uno podía defenderse tan bien sin apenas saber de qué hablaba mal podía merecer respeto", dice en su autobiografía.

No se crea que Weil carecía de otros intereses. Su fascinación por la cultura hindú y, en particular, por la literatura épica hindú y el Bhagavad Gita, contribuyó a decidirle a aceptar un puesto docente en la India en 1930. Dos años más tarde se había enredado en las complejidades de la política académica local y fue despedido, pero no antes de conocer a Gandhi. Weil tomaba té con el líder indio en la época en que éste planeaba la revuelta que habría de derrocar al Raj británico.

De vuelta a Francia, fue profesor de la Universidad de Estrasburgo. Dos años después, a causa de la beligerancia de Alemania, el gobierno francés ordenó a Weil que se presentara para cumplir el servicio militar. Lo que hizo Weil fue huir a Finlandia, que en el aquel momento todavía no había sido invadida por la Unión Soviética. Weil confiesa que hubo cierta dubitativa ambivalencia en su decisión de escapar del servicio militar. "La idea fundamental, que considero correcta, era que como soldado yo sería completamente inútil, mientras que como matemático quizá pudiera hacer algo. Desde luego, eso ocurría en tiempos de Hitler, y yo estaba completamente de acuerdo en que el mundo no debería doblegarse ante él, pero era incapaz de imaginarme a mí mismo tomando parte en ese empeño."

Para su desgracia, aquel joven profesor que se pasaba horas y horas escribiendo símbolos abstractos levantó las sospechas de los finlandeses, temerosos de una ocupación por la Unión Soviética. La policía finesa le detuvo y, según alguien le contó posteriormente, estuvieron a punto de ejecutarle, sin saber que sólo era un matemático francés huido de la leva. No acabaron aquí sus problemas, pues los finlandeses le devolvieron a las autoridades francesas, que inmediatamente lo condenaron por deserción y volvieron a encarcelarle.

"Cuando un teorema se demuestra mediante ordenadores, estoy seguro de que más adelante será demostrado sin ellos."

Weil pasó seis meses en prisión y allí creó su teorema sobre la hipótesis de Riemann; acabó siendo puesto en libertad a cambio de su incorporación al ejército francés. Su capacidad para aprovechar al máximo su encarcelamiento fue ocasión de bromas por parte de sus colegas. En cierta ocasión en que Weil, cosa rara en él, dio un traspiés durante una exposición, el eminente matemático Herman Weyl propuso que se le devolviese a prisión para que pudiera resolver debidamente el problema.

Cuando los alemanes pusieron en desbandada al ejército francés, Weil huyó a Inglaterra. Pudo finalmente llegar hasta los Estados Unidos, donde comenzó a buscar trabajo. La autoestima de Weil se vio muy afectada cuando supo con pesar que la única institución que le ofrecía un puesto remunerado era la Universidad Lehigh en Pennsylvania, lugar que recuerda como una "mediocre escuela de ingeniería asociada a la empresa Bethlehem Steel".

En 1947, tras una breve estancia en Brasil, se trasladó a la Universidad de Chicago, donde reanudó su trabajo en Bourbaki. El proyecto había comenzado a mediados del decenio de 1930, cuando Weil y media docena de colegas, preocupados por lo que consideraban carencia de textos adecuados de matemáticas, se comprometieron a escribir los suyos propios. Decidieron que, en lugar de publicar con sus verdaderos nombres, inventarían un personaje pseudónimo, a modo de mascarón de proa: Nicolas Bourbaki, aclamado y eminente profesor venido del no menos ficticio estado de Poldavia.

Muy pocos, aparte de quienes formaban su círculo inmediato, adivinaron al principio la verdadera identidad de Bourbaki. No obstante, las dudas fueron creciendo conforme el grupo fue lanzando vastos tratados que tocaban prácticamente todos los campos de las matemáticas. En 1949, Ralph Boas proclamaba en un artículo del anuario de la Encyclopaedia Britannica que Bourbaki era un pseudónimo y no una persona física. Weil escribió una carta de tono indignado, negando la acusación. Los miembros de Bourbaki empezaron entonces a propalar el rumor de que Boas no existía.

Aunque otros matemáticos más jóvenes han continuado perpetuando el legado de Bourbaki, su influencia se ha desvanecido. El propio Weil, que dejó el grupo a finales del decenio de 1950, opina que "en ciertos aspectos, la influencia ha sido beneficiosa, pero en otros no lo ha sido". Tal vez la contribución más importante de Bourbaki haya consistido en hacer realidad una famosa propuesta formulada en 1900 por el gran matemático alemán David Hilbert, en el sentido de que las matemáticas fuesen asentadas sobre bases más seguras. "Hilbert se limitó a enunciarla; Bourbaki la llevó a cabo", declara Weil. El hincapié de Bourbaki en la abstracción y la axiomatización fue en ocasiones demasiado lejos, pero Weil subraya que no ha sido el propio Bourbaki, sino sus seguidores, quienes perpetraron estos desmanes.

Weil llegó al Instituto de Estudios Avanzados en 1958, donde continuó sondeando las conexiones profundas entre la aritmética, el álgebra, la geometría y la topología. Estos esfuerzos de unificación engendraron el campo de indagación más vivo quizá de la matemática moderna. Aunque oficialmente se jubiló en 1976, sigue acudiendo a su despacho casi todos los días. Cultiva allí una antigua pasión, la historia de las matemáticas. En la actualidad colabora en la edición de las obras de dos gigantes franceses del pasado, Jacques Bernoulli y Pierre de Fermat.

Ciencia y sociedad

Paleoantropología europea

Raíz georgiana

Fue en Europa, durante el siglo pasado, donde se exhumaron los primeros fósiles humanos. Algunas zonas pasaron a convertirse en santuarios de la Prehistoria. Sin embargo, al generalizarse las investigaciones, Asia y sobre todo Africa han aportado los documentos más antiguos relativos a los dos géneros *Homo*, de un par de millones largos de edad el más viejo, y a *Australopithecus*, que tendría unos cuatro millones de años.

En Europa, si se exceptúa un fragmento craneano de difícil interpretación encontrado en España, el resto más antiguo era hasta hace poco la mandíbula inferior encontrada en Mauer, cerca de Heidelberg. La pieza se puede asignar, en razón de ciertas características, a un antepasado de neandertal, lo mismo que neandertales serían los demás restos humanos encontrados en niveles más recientes hasta la aparición del hombre moderno. Su edad geológica parece que no supera los 500.000 años.

Pese a todo, según los restos líticos, la presencia del hombre está atestiguada desde mucho antes. Si la presencia de industrias de piedra parece segura hasta niveles fechados en cerca de un millón de años, otros vestigios podrían remontarse más atrás, y algunas dataciones alcanzarían los dos millones de años o más. Conviene resaltar que, en Asia, los restos más antiguos no parece que superen los 1,2 a 1,4 millones de años. La ausencia de elementos óseos en Europa no cesaba, pues, de incomodar a los especialistas. Hasta que, en el boletín de la *Society of Vertebrate Paleontology*, investigadores georgianos anunciaron haber acabado con el maleficio que se cernía sobre los paleontólogos europeos.

Georgia siempre ha sido famosa por la longevidad de sus habitantes y por el número elevado de centenarios entre su población. Ahora se distingue por el descubrimiento del representante europeo más viejo del género *Homo*. L. Gabunia y A. Vekua, del Instituto de Paleontología de la Academia de Ciencias de Georgia, analizan la mandíbula inferior humana encontrada en Dmanisi en Georgia oriental. En su opinión, la pieza tendría dientes de dimensiones moderadas con molares de tamaño decreciente desde el primero hasta el último. En estos molares, la presencia de tubérculos dibuja un esquema primitivo, “driopiticiano”. El hueso, por contra, sería tosco y sin mentón. La rama ascendente se encuentra en una posición anterior, reduciendo así el espacio por detrás del último molar. Esta última característica separa la mandíbula de Dmanisi de la hallada en Mauer, cuyo espacio retromolar es notable.

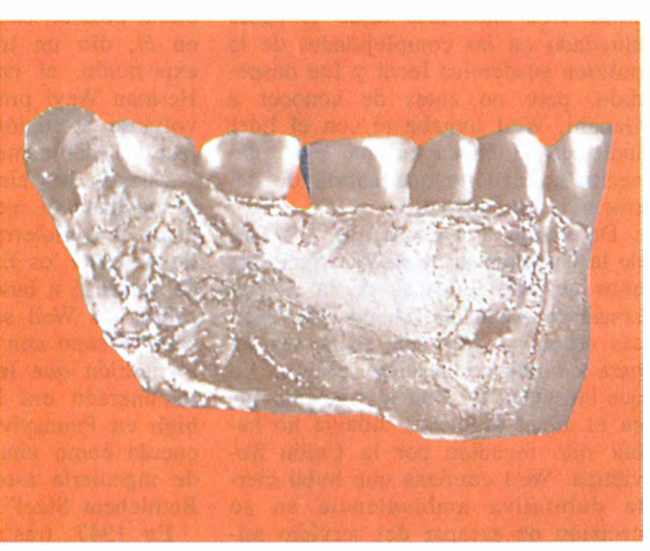
La fauna, estudiada juntamente con A. Muskhelishvili, indica una edad relativamente antigua, dada la presencia del elefante meridional *Archidiscodon meridionalis*, de la hiena *Pachycrocuta* y dos felinos singulares. Uno de ellos, el *Homotherium*, posee caninos superiores alargados y aplanados en hoja de sable. El otro, el *Meganthereon*, tiene caninos superiores en hoja de puñal.

En los emplazamientos europeos inferiores al millón de años, desaparecen tres de estas formas, y el *Homotherium* es sustituido por otro felino de caninos alargados, *Dinobastis*. Otras especies del yacimiento de Dmanisi como el rinoceronte, el lobo y el oso etruscos (*Dicerorhinus etruscus*, *Canis etruscus* y *Ursus etruscus)* se han descrito por primera vez en yacimientos del valle del Arno en Italia (de ahí proviene su epíteto de especie) en niveles fechados en más de un millón de años, pero también pueden ser algo más recientes.

Esta gavilla de datos nos muestra que la mandíbula inferior de Dmanisi, con una edad superior al millón de años, puede considerarse el resto fósil humano más antiguo de Europa. Los autores lo atribuyen al género *Homo* sin precisar la especie. Si se



1. Mandíbula del hombre de Mauer cerca de Heidelberg. Determinadas características permiten ver en ella un precursor de los neandertales que vivían hace 500.000 años



2. El hombre de Dmanisi, encontrado en Georgia, se aproxima al Homo erectus *y al* Homo habilis. *Su edad es superior a un millón de años. La reconstrucción es de L. Gabunia y A. Vekua*

tienen en cuenta los fósiles del mismo género exhumados en Africa o en Asia en épocas también remotas, se atribuyen al *Homo erectus* y, para los más antiguos (hacia los dos millones de años), al *Homo habilis*. Si la nueva muestra se relacionara con una u otra de estas especies (pareciendo más probable hacerlo con la primera de ellas), sería la primera vez que una de estas especies se asignara con certeza en nuestro continente. Europa, que ya ha proporcionado Homínidos en series mucho más antiguas, revelará aún indudablemente otros documentos relativos a los últimos dos millones de años de la evolución humana.

LOUIS DE BONIS
Universidad de Poitiers



La reducción de las emisiones de dióxido de carbono medida en la atmósfera a partir de la erupción del Pinatubo en junio de 1991 quizá se deba a esta misma

¿No se estaba calentando la Tierra?

La medición del CO_2 en Mauna Loa muestra que su acumulación decrece

Desde 1958, fecha en que se empezó a medir la tasa de acumulación del dióxido de carbono en la atmósfera, se ha observado un incremento continuo, perturbado sólo por fluctuaciones estacionales menores. Pero hará unos cuatro años la tendencia dejó de ser tan clara. Primero hubo una disminución, luego una nivelación; entonces se reanudó el descenso, esa vez marcadamente. Tras semejantes hechos, los científicos, entre ellos los del observatorio de Mauna Loa en Hawai, fundado por el difunto Harry Wexler para hacer ese tipo de mediciones, se preguntan qué está pasando.

Por si fuese poca la confusión, Charles D. Keeling, de la Universidad de California en San Diego (U.C.S.D.), que ha manejado en el observatorio, desde su fundación, un analizador de gases, dice que la acumulación empezó a venirse abajo cuando la atmósfera andaba sumida en las agonías de un episodio de El Niño, variación periódica de la circulación de los alisios sobre el Pacífico que afecta al clima global y a las corrientes oceánicas. Durante un episodio de El Niño, tal como los de 1982-83 y 1986-87, el nivel del dióxido de carbono en la atmósfera tiende a crecer más deprisa que en otras circunstancias. Keeling sospecha que las plantas y los suelos liberan más dióxido de carbono durante El Niño porque, cuando se desploma un monzón asiático, se origina una sequía. Cualquiera que sea la causa que ha estado reduciendo el aporte de dióxido de carbono a la atmósfera, su influjo fue tal que anuló por completo los efectos de El Niño.

Semejante conmoción climática puede deberse a unos cuantos fenómenos. Sólo cabe eliminar inmediatamente una explicación: la cantidad de dióxido de carbono desprendida por la combustión de carburantes fósiles no ha disminuido. Tras ésta, la razón que primero se viene a la cabeza es la erupción del Monte Pinatubo, en Filipinas, en 1991. "Que la erupción tenga algo que ver no pasa de ser una mera conjetura, pero tienta el pensar en ella por la coincidencia en el tiempo", dice Ralph K. Keeling, hijo de Charles Keeling y compañero suyo en la U.C.S.D. Por supuesto, descubrir si la misteriosa fuente está en el mar o en tierra reduciría el campo de búsqueda. Por desgracia, diferentes pruebas han conducido a indicaciones contradictorias.

La relación de carbono 13 a carbono 12 en la atmósfera es uno de los parámetros pertinentes. La fotosíntesis en tierra prefiere el isótopo más ligero; el intercambio de gases en el mar, en cambio, sólo discrimina ligeramente entre los dos. "Vimos que el cociente subía, de lo que se desprendería que se produjo un aumento de la absorción del dióxido de carbono por la biosfera terrestre", dice Pieter P. Tans, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EE.UU.: "Pero pudo haber un error considerable en la medida, que depende mucho de la calidad de la calibración." Tanto es así, que a lo largo del año pasado, en varias reuniones, se comunicaron medidas dispares de la razón entre los isótopos del carbono. Al principio, los datos de Charles Keeling señalaban que había un gran sumidero en el mar; tras corregir las calibraciones, los resultados, por el contrario, apuntaron a que se encontraba sobre todo en tierra.

La emisión de oxígeno, por su parte, dice otra cosa. "Está bastante claro que la tierra no se comportó como corresponde a El Niño, pero los datos del oxígeno dan a entender que quizá tampoco los océanos se comportasen de forma normal", dice Ralph Keeling. Así como las reacciones en suelos y aguas prefieren ciertos tipos de isótopos, también la formación y consumo de materia orgánica emplea proporciones variables de oxígeno y carbono. Además, el carbono es muy reactivo en el mar, donde el oxígeno es químicamente inactivo.

Tras rumiar no poco los números, del conjunto de estos hechos se sigue que si el sumidero estuviera principalmente en tierra, como sugieren los datos de los isótopos de carbono, el cambio de la tasa de crecimiento del oxígeno atmosférico apenas si debería diferir de la variación experimentada en los últimos tiempos por el dióxido de carbono. Pero Ralph Keeling ha observado emisiones de oxígeno que aumentaban unas dos veces más bruscamente que la caída de la tasa del dióxido de carbono tras el episodio del Pinatubo. Este dato indica que hubo importantes cambios en el océano.

Con independencia de dónde se

encontrase el sumidero de carbono, los científicos tienen todavía ante sí el problema de explicar por qué surgió. Hay varios modelos basados en la deposición de cenizas del Pinatubo que es posible que esclarezcan por qué cayeron las emisiones de dióxido de carbono. El enfriamiento global, medido en la baja troposfera por satélite, es una vía convincente. Afectaría al balance entre la fotosíntesis y la respiración en tierra y conduciría a una absorción neta de dióxido de carbono en los océanos. "Pudo desbaratar bruscamente, a corto plazo, el balance de carbono. En 1994, si la temperatura vuelve a la normalidad, deberíamos tener de nuevo el habitual crecimiento del dióxido de carbono", observa Tans.

Entonces, ¿se está acabando el calentamiento global? Tans no lo cree. La reducción de la acumulación de dióxido de carbono, piensa, es temporal. "Es dudoso que el crecimiento del dióxido de carbono se mantenga bajo", dice. "Pero hay que tener en cuenta lo que ha ocurrido, aunque sólo sea porque demuestra que en realidad no sabemos qué le está pasando al más importante de los gases de invernadero de producción humana."

KRISTIN LEUTWYLER

Antisabiduría total

Una variopinta cuadrilla de pensadores curiosea por los límites del conocimiento

"Saber lo que no sabes / es, / de algún modo, / saberlo todo." Esta ripiosa formulación del físico y poeta danés Piet Hein podría epitomizar la idea que juntó hace poco en el Instituto Santa Fe a los veinte participantes en un seminario sobre "los límites del conocimiento científico". Matemáticos, físicos, biólogos y economistas se reunían con la idea de que la ciencia podría alcanzar algo parecido a una antiomnisciencia.

Uno de los organizadores, Joseph F. Traub, informático de la Universidad de Columbia, planteó la pregunta: ¿podemos demostrar que la ciencia tenga límites?, señalando a continuación que las matemáticas han logrado algunos éxitos en la delimitación de sus propias fronteras. El caso más impresionante fue la demostración, realizada por Kurt Gödel en el decenio de 1930, de que todos los sistemas matemáticos de alguna complejidad son "incompletos", es decir, permiten formular proposiciones que no pueden ni probarse ni refutarse mediante los axiomas del propio sistema.

Gregory J. Chaitin, que es matemático del centro de investigación J. Watson, de IBM, ve consecuencias más ominosas en el teorema de Gödel, pues a esta idea le siguieron otras del mismo tenor, en concreto la del propio Chaitin de que las matemáticas están llenas de verdades aleatorias, carentes de base lógica o causal. Todo esto hace que vayan viendo minada su pretensión de lograr la verdad absoluta y que se afronten cada vez más como una tarea empírica y experimental.

No faltan colegas suyos que encuentren excesivo su pesimismo, como Francisco A. Doria, de la Universidad Federal de Río de Janeiro, quien considera que los obstáculos descubiertos por Gödel y sus seguidores enriquecen las matemáticas. En su opinión, cuando uno se encuentra con una proposición indemostrable o "indecidible" que le bloquea el camino, lo que debe hacer es una suposición arbitraria sobre su verdad o falsedad y ver qué resultados se derivan de ello.

El segundo organizador del seminario, John Casti, también matemático y de Santa Fe, indica que la verdad es que Gödel mismo nunca creyó que su teorema plantease ningún tipo de barrera especial al conocimiento. Una de las soluciones que él le ve al brete es que en el trabajo matemático se empleen sistemas tan sencillos que no den pie a la incompletitud, al tiempo que cree que el teorema de Gödel se convierte en una "serpiente de verano" si se intenta aplicarlo a las ciencias naturales.

Pero hay discrepancias. Robert Rosen, biofísico de la Universidad Dalhousie de Halifax, sostiene que la "dificultad preternatural" con que se han tropezado los biólogos al tratar de definir la vida con precisión tiene que ver con el concepto de incompletitud. No cree que lo que se sabe sobre este tema sean meras curiosidades intelectuales y piensa que es en la biología donde mejor pueden apreciarse todas sus consecuencias.

Y, por otro lado, está la trampa del regreso infinito. Cuando un inversor trata de predecir el comportamiento de la bolsa lo que realmente está intentando es pronosticar cómo adivinarán unos terceros inversores la dirección en que se orientarán otros inversores distintos, y así sucesivamente. Para W. Brian Arthur, economista compartido entre Stanford y Santa Fe, la actividad económica es intrínsecamente subjetiva y, por tanto, impredictible.

Sin embargo, que algunos aspectos de un sistema sean impredictibles no quiere decir que lo sean todos, recalca Lee Segel, matemático del Instituto Científico Weizman israelí. No puede especificarse la trayectoria de una partícula individual de aire a su paso sobre un ala, pero sí puede calcularse la presión ejercida sobre el ala por el flujo de aire, lo que es una información bastante más útil. Piensa por ello que, antes de darse por vencido por un problema, hay que considerarlo desde distintas perspectivas.

Una historia feliz de este tipo es la que presenta Piet Hut, astrofísico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Uno de los problemas más difíciles de la astronomía es el de los n cuerpos, que trata de predecir el decurso temporal de tres o más objetos que se muevan en sus campos gravitatorios recíprocos. Hut ha atajado el problema, como lo han hecho otros, desarrollando poderosos métodos estadísticos que calculan el efecto de las interacciones gravitatorias entre los miles de millones de estrellas que hay en las galaxias.

También la historia del cómputo cuenta con casos que muestran lo ilusorio de muchos de los límites predichos. Así, por ejemplo, hubo un tiempo en que se creyó que la segunda ley de la termodinámica y hasta la mecánica cuántica imponían restricciones al cálculo, pero todo ello ha resultado falso. Rolf Landauer, físico del centro Watson, considera que los mayores límites con que se enfrenta el progreso de la computación son los presupuestarios.

Nuestros ordenadores y nuestras herramientas matemáticas siguen mejorando, pero puede que ello no redunde en una mejor comprensión del mundo. Roger N. Shephard, psicólogo de Stanford, imagina una situación en que los investigadores logren construir un ordenador tan potente que remede la inteligencia humana; puede que lo que así se consiguiera fuera desnudar a un santo para vestir a otro, pues quizá nos estemos encaminando hacia un mundo en el que lo que sabemos sea demasiado complicado para entenderlo.

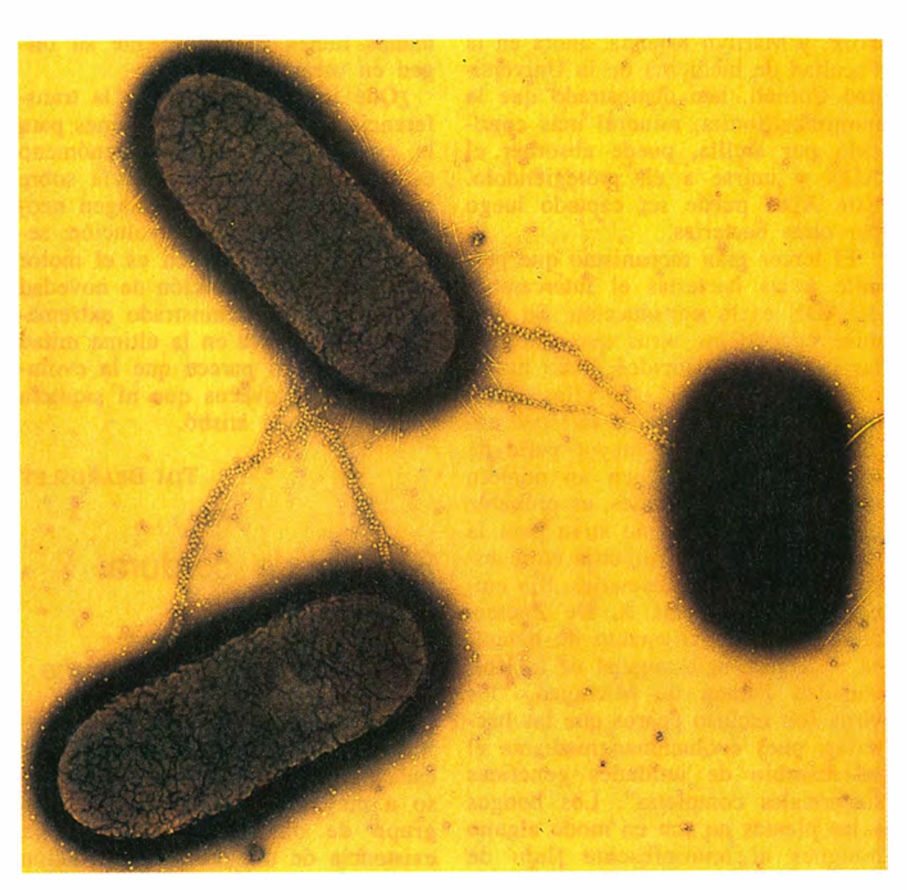
Para Hut, es la estructura del universo físico lo que representa el límite final del conocimiento humano. Puede que la física de partículas no sea capaz de comprobar nunca las teorías que unifican la gravedad con las otras fuerzas naturales, pues los

efectos que anticipa sólo serían perceptibles a niveles de energía que superan los de cualquier experimento imaginable. Y los cosmólogos no podrán llegar a saber nunca qué es lo que precedió al nacimiento del universo, suponiendo que fuese algo.

Todas estas lucubraciones llenaban de satisfacción a otro de los asistentes, Ralph E. Gomory, ex director de investigación de IBM y actual presidente de la Fundación Alfred P. Sloan neoyorquina, que patrocinó el simposio. Es idea antigua de Gomory que los sistemas educativos prestan muy poca atención a lo que no se sabe e incluso a lo que es incognoscible y puede que, para remediarlo, la Fundación Sloan ponga en marcha un proyecto sobre los límites del conocimiento.

De momento, Gomory propone un lenitivo para la tarea científica: hagamos el mundo más artificial, ya que los sistemas artificiales suelen ser más predictibles que los naturales. Por poner un ejemplo: podría simplificarse el pronóstico meteorológico si se rodease la Tierra con una cúpula transparente. Sus contertulios le miran desconcertados, pero su rostro se mantiene impasible. Para salir del apuro, Traub afirma: "Creo que lo que quiere decir Ralph es que es más fácil crear el futuro que predecirlo".

JOHN HORGAN



La conjugación es el proceso por el que el ADN migra de una bacteria a otra mediante puentes que las unen. Los que aquí vemos unen a un "macho" con dos "hembras"

La ronda

El incesante ir y venir de la molécula maestra de la vida

Cada vez hay más pruebas de que una ventisca de material genético sopla libremente por el mundo microbiano; no sólo entre bacterias de la misma especie, sino, también, entre miembros de especies muy alejadas y entre bacterias y virus. "En términos de flujo de ADN", dice Julian E. Davies, microbiólogo de la Universidad de la Columbia Británica, "la impresión general es que va a parar a todas partes". Y, aunque el material genético de las plantas y los animales pluricelulares tiende a estar más sujeto, el intercambio le afecta también.

La investigación reciente ha revelado cómo puede producirse parte de esta promiscuidad. Desde los años veinte se sabe que las bacterias intercambian material genético entre las de su clase. Un método, la conjugación, es la versión bacteriana del sexo: los genes se transfieren de una bacteria a otra a través de un tubo especial. En 1958 Joshua Lederberg compartió el Premio Nobel por investigaciones en las que se hacía uso de esta característica.

En los años ochenta, cuando los investigadores empezaron a sospechar que había propagación génica entre las especies, la conjugación empezó a llamar la atención no sólo de los eruditos. En 1985, al comprobar que los genes que controlan la resistencia a la neomicina y la kanamicina en tres especies diferentes eran virtualmente idénticos, Patrick Trieu-Cuot demostró que, de hecho, había movimiento génico entre bacterias muy distantes. A menudo los genes bacterianos se transmiten en plásmidos: pequeños círculos parásitos de ADN independientes del cromosoma bacteriano. Algunos datos notables proceden de Abigail A. Salyers de la Universidad de Illinois. Esta autora demostró que, cuando las bacterias se exponen al antibiótico tetraciclina, emplean una diversidad de métodos, algunos todavía misteriosos, para acelerar el intercambio de los genes que controlan la resistencia a este antibiótico.

Al menos en el laboratorio, el estrés ambiental parece intensificar la conjugación entre especies diferentes. Investigadores alemanes han encontrado una posible explicación. El equipo de Alfred Pühler de la Universidad de Bielefeld demostró que el calor, los ácidos, los álcalis y el alcohol inhiben la acción de las enzimas de *Corynebacterium* encargadas de hidrolizar el ADN foráneo. Así tratadas, las bacterias son capaces de aceptar mejor el ADN de *Escherichia coli*. Pühler observa que si el estrés ambiental promueve el intercambio de genes entre especies bacterianas, los que se introducen deliberadamente por ingeniería genética en los microorganismos podrían propagarse en la naturaleza con más facilidad de lo que lo hacen en el laboratorio.

La transformación es otro mecanismo usado por las bacterias para intercambiar material genético. Ocurre cuando una bacteria absorbe ADN pelado del ambiente, ADN que puede haber dejado un experimentador o algún otro microorganismo, quizá después de morir. Dado que el ADN es una molécula poco estable fuera de las células, la transformación es, con bastante probabilidad, menos importante en la naturaleza que la conjugación. No obstante, Guenther Stotzky de la Universidad de Nueva

York, y Marilyn Khanna, ahora en la Facultad de medicina de la Universidad Cornell, han demostrado que la montmorillonita, mineral más conocido por arcilla, puede absorber el ADN y unirse a él, protegiéndolo. Este ADN puede ser captado luego por otras bacterias.

El tercer gran mecanismo que permite a las bacterias el intercambio de ADN es la transducción. Se produce cuando los virus que atacan a las bacterias, conocidos como bacteriófagos, arrastran con ellos ADN que han adquirido en su huésped anterior. Dado que la mayor parte de los bacteriófagos tienen un número restringido de huéspedes, es probable que la transducción no sirva para la transmisión génica rutinaria entre especies distantes de bacterias. Sin embargo, para Gustaaf A. De Zoeten, director del departamento de botánica y de patología vegetal de la Universidad Estatal de Michigan, "los virus son incluso peores que las bacterias, pues evolucionan mediante el intercambio de unidades genéticas funcionales completas". Los hongos y las plantas no son en modo alguno inmunes al omnipresente flujo de ADN. Se sabe desde hace tiempo que la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* transfiere plásmidos a las plantas. Y en 1989 Jack A. Heinemann, de la Universidad de Oregón, demostró que los plásmidos bacterianos podrían transmitirse a las levaduras a través de un proceso muy similar a la conjugación.

En experimentos publicados en *Science* el pasado marzo, Ann E. Greene y Richard F. Allison observan que los virus vegetales pueden combinar su genoma ARN con el ARN copiado de los genes de plantas tratadas por ingeniería genética. Aunque la situación que Greene y Allison estudiaron era artificial, quizás en unos pocos años se comercialicen plantas a las que se hayan introducido genes víricos útiles por ingeniería genética. Según De Zoeten, los resultados de Greene y Allison indican la necesidad de una mayor investigación para establecer la inocuidad de esas plantas.

Hasta la fecha se dispone de pocas pruebas a favor del intercambio masivo y de larga duración entre especies diferentes de animales o de plantas pluricelulares. Pero sería necio suponer que los animales están completamente al margen de este bucle. En 1985 Joe V. Bannister y sus colegas de la Universidad de Oxford encontraron indicios de que genes de una especie de pez habían sido transferidos a una bacteria. Y los genes que los virus introducen en seres humanos tienen probablemente su origen en otros animales.

¿Qué implicaciones tiene la transferencia interespecífica de genes para la evolución? Aunque el fenómeno es real, poco se sabe todavía sobre cómo suele ocurrir. La imagen neodarwinista típica de la evolución, según la cual la mutación es el motor principal de introducción de novedad genética, se ha demostrado extremadamente poderosa en la última mitad del siglo. Pero parece que la evolución tiene recovecos que ni siquiera Charles Darwin atisbó.

TIM BEARDSLEY

Prueba de cordura

Desconcertantes observaciones de objetos que se agavillan en la noche

Cuanto más lejos se escruta el espacio, más se aprecia lo intrincada que es la estructura del universo a muy gran escala. En 1987, un grupo de observadores infirió la existencia de una vasta acumulación de materia a la que se apodó el "Gran Atractor". Dos años después, otro equipo descubrió la "Gran Muralla", agregación de galaxias cuya anchura es, por lo menos, de quinientos años luz. Nuevos rastreos celestes, que han abarcado grandes fragmentos del universo, proporcionan indicios de agregaciones aún mayores. Los teóricos andan obsesionados con el origen de estructuras tan enormes en un cosmos que, conforme a lo que hoy se sabe, era al principio casi perfectamente uniforme. "Los nuevos recuentos son muy impresionantes", dice Margaret J. Geller, del Centro de Astrofísica Smithsoniano de Harvard, "pero nuestra ignorancia no lo es menos".

Y sabe de lo que habla. A lo largo de los últimos diez años, los datos proporcionados por ella y por otros astrónomos —en especial John P. Huchra, también del Centro de Astrofísica— han puesto en un brete hasta a la teorización más ingeniosa. En sus investigaciones miden el desplazamiento al rojo (el estiramiento de la luz debido a la expansión del universo) de miles de galaxias, indicador de las distancias aproximadas que las separan de la Tierra.

Gracias a estos trabajos se han confeccionado mapas cada vez más amplios donde se ve que las galaxias se disponen a lo largo de las superficies, parecidas a burbujas, de gigantescos "vacíos". Los diámetros de estas regiones, desiertas en comparación con las demás, miden nada menos que 150 millones de años luz (la Vía Láctea sólo tiene una amplitud de unos 100.000 años luz). La Gran Muralla parece más bien una capa de galaxias que delimita los vacíos.

Su descubrimiento ha suscitado dos preguntas cruciales: esas formaciones, ¿son normales en el universo en general? ¿Contiene el universo estructuras aún mayores? En busca de una respuesta, los investigadores del Centro de Astrofísica se han asociado con astrónomos que trabajan en Argentina, Chile y Sudáfrica. Los observatorios de estos lugares pueden escrutar las partes meridionales del cielo, invisibles para el Observatorio Whipple de Arizona, donde se habían efectuado la mayoría de los mapas anteriores. Luis Nicolaci da Costa, del Observatorio Nacional brasileño, que hizo estudios de doctorado en el Centro de Astrofísica, encabezó el grupo que se encargó de la confección de un mapa de galaxias australes.

En este último inventario aparecen casi 3600 galaxias, cuya distribución en el cielo austral es muy similar a la del cielo boreal. Por ejemplo, Da Costa y sus colaboradores han descubierto un elemento muy semejante a la Gran Muralla; como era de esperar, ha recibido el nombre de Muralla del Sur.

Sin embargo, los análisis estadísticos ponen de manifiesto algunas diferencias en ciertas medidas, lo que resulta importante porque de ellas se sigue que hay partes del universo donde existen estructuras aún mayores que las abarcadas por el mapa norte-sur ya realizado. Si no fuese así, cualquier zona del universo tendría que parecerse a cualquier otra, por lo que se refiere a los promedios estadísticos. Da Costa y sus compañeros de equipo llegan a la conclusión de que la escala de variación de los tipos de "caparazones" galácticos que se ven en el mapa es de unos 300 millones de años luz. Podría haber estructuras aún mayores, tanto que, simplemente, no aparecen en los estudios actuales.

En los últimos años, se ha descubierto que el universo se aleja de la uniformidad todavía de otra e inesperada manera. Parece que la Vía Láctea y todas las galaxias que están a nuestro alrededor se apresuran en dirección a la constelación de Leo; ese movimiento se superpone a la expansión cósmica general, asociada a la gran explosión inicial. En 1987, Alan M. Dressler, de los Observatorios de la Institución Carnegie de Wa-

shington, y sus seis colaboadores (se les llama los Siete Samuráis) analizaron esos movimientos y llegaron a la conclusión de que se deben a la atracción gravitatoria de una masa enorme, a la que denominaron el Gran Atractor.

Intrigados por este dato, Tod R. Lauer, de los Observatorios Nacionales de Astronomía Optica de Tucson, y Marc Postman, del Instituto Científico del Telescopio Espacial de Baltimore, emprendieron lo que llaman una "prueba de cordura" para asegurarse de que el Gran Atractor era real. Para ello midieron los movimientos de las galaxias de una región cuyo volumen era treinta veces el del espacio examinado por el grupo de Dressler. Si el Gran Atractor es un elemento suelto, local, explica Lauer, debería manifestarse como una zona de movimientos galácticos aberrantes inmersa en un grupo mayor que no muestre un movimiento neto.

Lauer y Postman estudiaron las galaxias elípticas más brillantes de 119 cúmulos galácticos situados a distancias de hasta 500 millones de años luz de la Tierra, en todas las direcciones. Por trabajos anteriores se sabía que las galaxias elípticas gigantes tienen una luminosidad intrínseca bastante parecida, así que basta conocer su brillo aparente para saber a qué distancia se hallan. Midieron entonces el desplazamiento al rojo de cada galaxia, que revela su velocidad, y lo compararon con el valor esperado para un objeto que se encuentre a esa distancia.

A escalas muy grandes —de unos mil millones de años luz— Lauer y Postman esperaban, como hacen la mayor parte de sus colegas, que la dispersión de la materia por el cosmos fuese muy regular. Si fuera así, las galaxias tendrían que aparecer, en promedio, en reposo con respecto al fondo de microondas cósmico, la radiación residual de la gran explosión, que aún llena el universo.

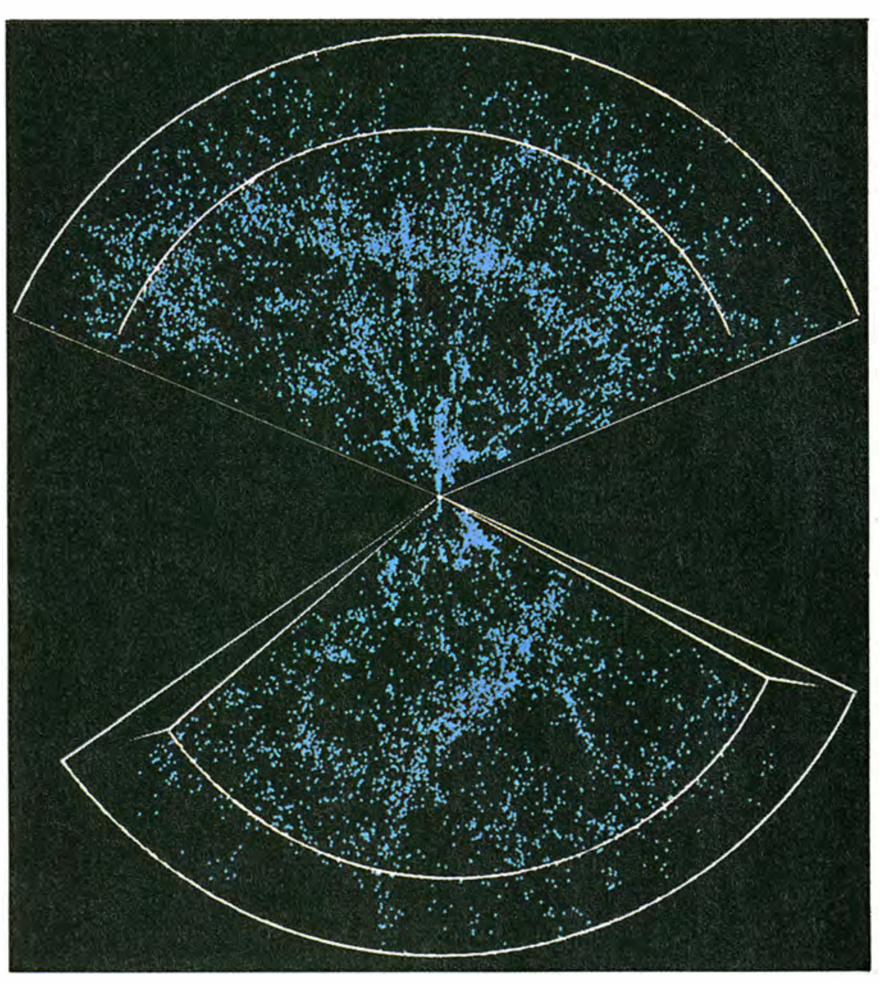
Cuando miraron los resultados, recuerda Postman, se quedaron muy sorprendidos, como poco: el grupo de galaxias entero volaba en dirección a la constelación de Virgo a una velocidad de unos 700 kilómetros por segundo. La increíble conclusión es que una tremenda aglomeración de materia situada más allá del borde de la región rastreada atrae a todas las galaxias que Postman y Lauer observaron (incluida, por supuesto, nuestra Vía Láctea). El Gran Atractor, pues, parece ser sólo una pequeña parte de un conglomerado de galaxias aún mayor. "Es una medición muy difícil y han hecho un trabajo maravilloso", dice P. James E. Peebles, de la Universidad de Princeton.

Estas inmensas estructuras dejan perplejos a los cosmólogos que intentan que los fragmentos de la historia del origen del universo casen. Los datos reunidos por un satélite, el *Explorador del fondo cósmico*, mostraron que la radiación de microondas que dejó la gran explosión (y, por extensión, la materia que estaba inmersa en esa radiación) prácticamente carecía de rasgos diferenciados. La gravedad, de una forma o de otra, juntó cúmulos grandes y pequeños de gas, formando galaxias, estrellas, planetas y personas. En un período suficientemente largo de tiempo, la gravedad podría ampliar irregularidades extremadamente ligeras hasta convertirlas en formaciones diferenciadas. Pero la última cosecha de murallas y atractores hace más intenso el misterio de la formación de tanta estructura en los quince mil millones de años que tiene el universo.

Muchos grupos de investigadores de todo el mundo compiten por añadir nuevas observaciones con las que contrastar los modelos y saber más de los procesos que convirtieron la confusión primordial en este cosmos actual tan organizado. Lauer y Postman planean quintuplicar el volumen de su rastreo. Postman expresa además mucho entusiasmo por una gran exploración digital del cielo en la que participarán varias instituciones; la dirige Donald G. York, de la Universidad de Chicago, y registrará los datos de un millón de galaxias a partir del año que viene.

Los cosmólogos han subestimado a menudo la desconcertante complejidad del universo, más evidente cada vez gracias a los telescopios modernos. "La verdad es que no creo que sepamos de qué manera se forman las estructuras del universo", dice Geller admonitoriamente. "Es un problema muy, muy difícil, mucho más de lo que se pensaba cuando yo empecé. La respuesta no está a la vuelta de la esquina."

COREY S. POWELL



Este mapa cósmico muestra la distribución irregular de unas 11.000 galaxias (los puntos azules)*; la recién descubierta Muralla del Sur atraviesa en diagonal la parte inferior del cielo*

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

La hora de la limpieza

Creíase, antes de que comenzaran a barruntarse las primeras hipótesis evolucionistas, que los animales podían ir ganando en perfección con el tiempo, sin saltar no obstante los lindes de su especie. De esa forma progresarían la vida y la naturaleza hacia unas cotas de armonía mayores. En esa época dorada de la historia natural, apenas pasaba un día sin que botánicos o zoólogos descubrieran nuevas maravillas de interrelaciones entre organismos. Así en la tierra, como en el mar.

Es en el medio acuático, en efecto, donde mejor se advierte que, de lo que unos individuos desechan, se alimentan otros. Son éstos los carroñeros y detritívoros. Pero también aquí hay sutiles muestras de cooperación. Vengamos, por ejemplo, a las tareas del aseo personal o limpieza. El crustáceo *Stenopus hispidus* L. tiene por misión eliminar los parásitos del *Sebasticus marmoratus* L. de la fotografía.

Los estenopodídeos presentan un pedúnculo antenular con numerosas espínulas y antenas con dos largos flagelos, de pareja longitud. Su tercer maxilípedo consta de siete segmentos. Menguado y unirramoso el primer pleópodo; los demás, birremes, portan los huevecillos si son hembras. Estos barberillos, de fama bien ganada entre los decápodos limpiadores de peces, parecen proclamar la excelencia de su labor con el colorido de su librea. De tal habilidad da testimonio la entrega sumisa de nuestro *Sebasticus*.

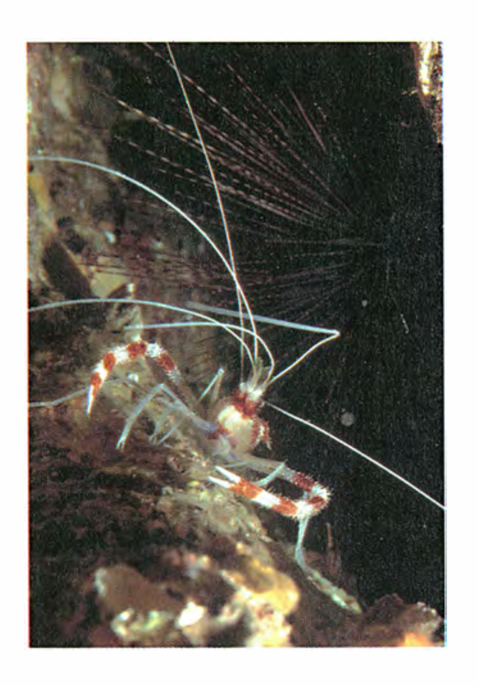


FOTO DE LA IZQUIERDA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25

FOTO DE LA DERECHA
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 5,6
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25



Barreras a la entrada de fármacos en los tumores sólidos

Muchos tumores oponen resistencia a la entrada de agentes anticancerosos. Esta es una de las razones del fracaso clínico de fármacos que consiguen destruir las células tumorales en condiciones de laboratorio

Rakesh K. Jain

Un agente que destruya las células cancerosas en una placa de cultivo debería, en teoría, destruir las mismas células en el organismo. Algunos de los fármacos que presentan una potente actividad anticancerosa en el laboratorio han salvado la vida de muchos pacientes, especialmente en caso de tumores pediátricos o de ciertas leucemias. Pero, por desgracia, la farmacopea existente no ha reducido apreciablemente el número de muertes debidas a la mayoría de los tumores sólidos que se presentan en el adulto, entre los que se cuentan el cáncer de pulmón y los de mama, colon, recto, próstata y cerebro.

Es poco probable que un único proceso pueda explicar estos resultados tan negativos. Sin embargo, investigaciones recientes indican que una propiedad de los tumores a la que se prestaba escasa atención, como es la resistencia a la penetración de los fármacos, puede tener buena parte de la responsabilidad en este fracaso de la terapia. Tras la administración de los fármacos por vía oral o por inyección, éstos viajan por la sangre hasta la célula tumoral. Para erradicar los tumores, los agentes deben dispersarse por las células malignas en concentraciones lo suficientemente elevadas para eliminarlas por completo. Los estudios que he realizado con mis colaboradores a lo largo de estos últimos 20 años han puesto de manifiesto que los tumores sólidos presentan a menudo barreras que se oponen a esa dispersión y que son difíciles de atravesar. La investigación de tales barreras está generando ideas interesantes que ayudarán a superarlas.

Si se logra vencer esos obstáculos, podría darse nuevo impulso a diversos enfoques terapéuticos, que tienen un denominador común: su eficacia dependerá de la acumulación óptima de los agentes medicamentosos en los tumores. Siempre que es posible, los especialistas tratan los tumores sólidos por extirpación quirúrgica o por radioterapia. Sin embargo, si no se consigue eliminar parte de la masa original primaria, o se sospecha que el tumor ha metastatizado, los médicos pueden recurrir a un tratamiento sistémico con fármacos para eliminar cualquier resto de tejido canceroso.

El tratamiento sistémico suele consistir en la administración de fármacos quimioterapéuticos tóxicos para las células que se estén dividiendo (incluidas, por desgracia, las células sanas). Más recientemente, la ingeniería genética y otras tecnologías han proporcionado una segunda clase de fármacos, consistentes en proteínas y otros productos biológicos. Este grupo incluye varias moléculas del sistema inmunitario, como el factor de necrosis tumoral, las interleucinas, los interferones y los anticuerpos monoclonales. Y también hay que reseñar los leucocitos conocidos como células asesinas naturales activadas por linfocinas (LAK) y los linfocitos infiltrantes de tumores, así como otros agentes diseñados para conseguir una terapia génica.

La radioterapia puede combinarse también con la administración de fármacos que alcanzan el tumor por vía sanguínea. Parte del efecto de la radioterapia se debe a la conversión de moléculas de oxígeno en formas con gran capacidad destructiva, que se llaman radicales libres. Pero no es raro que los tumores sean deficientes en oxígeno. En un intento de potenciar la vulnerabilidad de los tumores al tratamiento, los investigadores intentan comprobar la eficacia de agentes sensibilizantes de efectos parecidos al oxígeno, o que de alguna manera eleven el nivel de oxígeno de la masa tumoral. También pueden destruirse los tumores mediante calentamiento, y por eso a veces se administran fármacos que aumentan la respuesta de la masa tumoral al calor. En la terapia fotodinámica, se inyecta un compuesto que es relativamente inocuo en tanto no se haya expuesto a los rayos láser; una vez administrado, se deja transcurrir un cierto tiempo para que se acumule en el tumor, momento en el que los rayos láser se enfocan sobre la masa tumoral.

Estudiaba yo ingeniería química en la Universidad de Delaware cuando por vez primera sentí curiosidad por la posible resistencia de los tumores a la entrada de los fármacos en su interior. En 1974, James Wei, mi director de tesis, me facilitó que ayudara a Pietro M. Gullino en experimentos de medida de la captación de fármacos en tumores animales. A medida que ampliaba mis conocimientos sobre el tema, tomaba cuerpo en

RAKESH K. JAIN, que nació en la India, es profesor de biología tumoral en la cátedra Andrew Werk Cook del departamento de oncología radiológica en la facultad de Medicina de Harvard. Antes de trasladarse a Boston, había sido profesor de ingeniería química durante más de un decenio en la Universidad Carnegie Mellon.

1. CORTE IDEALIZADO de un tumor sólido en el que se ven los vasos sanguíneos. Antes de que un fármaco transportado por la sangre ataque las células malignas, ha de realizar tres tareas críticas (*detalle*). Ha de abrirse camino por un vaso microscópico situado cerca de las células malignas (*1*), salir del vaso hacia la matriz intersticial que lo rodea (*2*) y, por último, emigrar a través de la matriz hacia las células (*3*). El desarrollo de los tumores suele generar obstáculos a tales actuaciones.

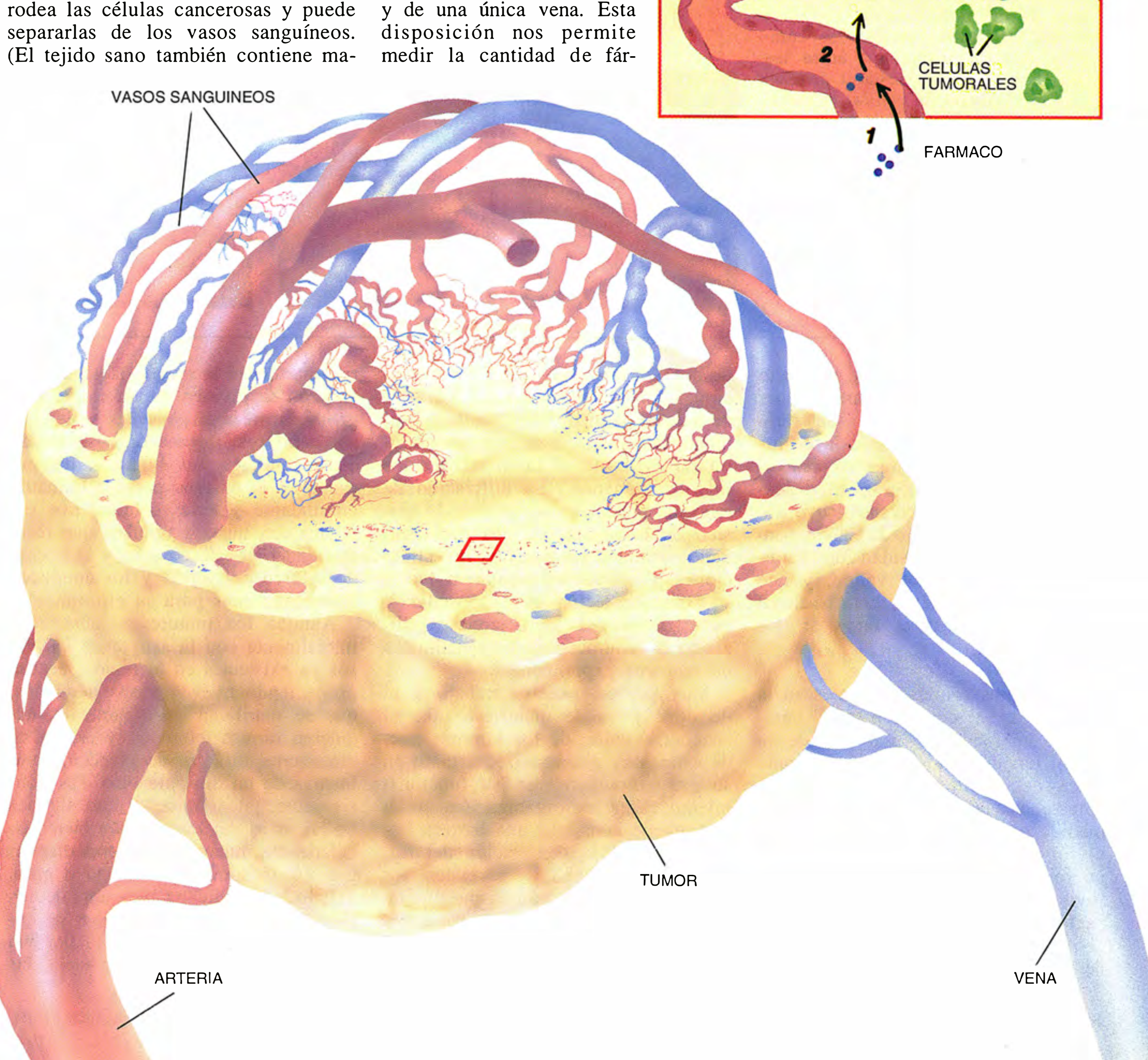
mi mente una idea clara: que el fallo de los agentes anticancerosos para distribuirse por la masa tumoral podría representar un obstáculo para la eficacia del tratamiento. Comencé a pensar que mi formación en el campo de la ingeniería, incluidos mis conocimientos sobre transporte de fluidos y de moléculas, podrían serme de gran utilidad en la exploración de esta posibilidad.

Ya la propia estructura de los tumores sugiere que puedan impedir la penetración de los fármacos. Frente a lo que suele pensarse, la masa de un tumor maligno no está constituida exclusivamente por cúmulos de células de gran capacidad proliferativa. Las células cancerosas ocupan a menudo menos de la mitad del volumen del tumor. Entre el uno y el diez por ciento de éste corresponde a vasos sanguíneos que se abren paso por la masa tumoral. El resto del espacio corresponde a una matriz rica en colágeno —la matriz intersticial—, que rodea las células cancerosas y puede separarlas de los vasos sanguíneos. (El tejido sano también contiene matriz extracelular, pero la de los tumores suele estar mucho más desarrollada.)

Para que un agente terapéutico pueda llegar a las células tumorales ha de abrirse paso a través de los vasos sanguíneos del tumor, atravesar la pared vascular y llegar a la matriz intersticial. La parte final del viaje hasta alcanzar las células, muchas veces larga, se realiza a través de ésta. Mis razonamientos me decían que cualquiera de estos pasos podía presentar problemas.

En nuestro trabajo hacemos uso de diversos métodos. Por ejemplo, en la Universidad Carnegie Mellon decidimos adoptar inmediatamente un método creado por Gullino en 1961. Consiste en hacer crecer tumores en roedores de tal manera que cada una de las masas tumorales esté conectada con el sistema circulatorio a través de una única arteria y de una única vena. Esta disposición nos permite medir la cantidad de fármaco que entra y sale de un tumor determinado. Con esos datos puede calcularse la cantidad de fármaco retenida. Basándonos en esta técnica hemos elaborado un procedimiento que nos permite estudiar los cánceres de colon que de manera espontánea aparecen en el hombre. Cuando el cirujano los extirpa, a veces puede proporcionarnos nódulos individuales en los que la circulación sanguínea dependa de una sola arteria y de una sola vena. Después nosotros mantenemos artificialmente la circulación.

Aunque con este tipo de enfoques consigamos una información de gran valor, el funcionamiento interno de



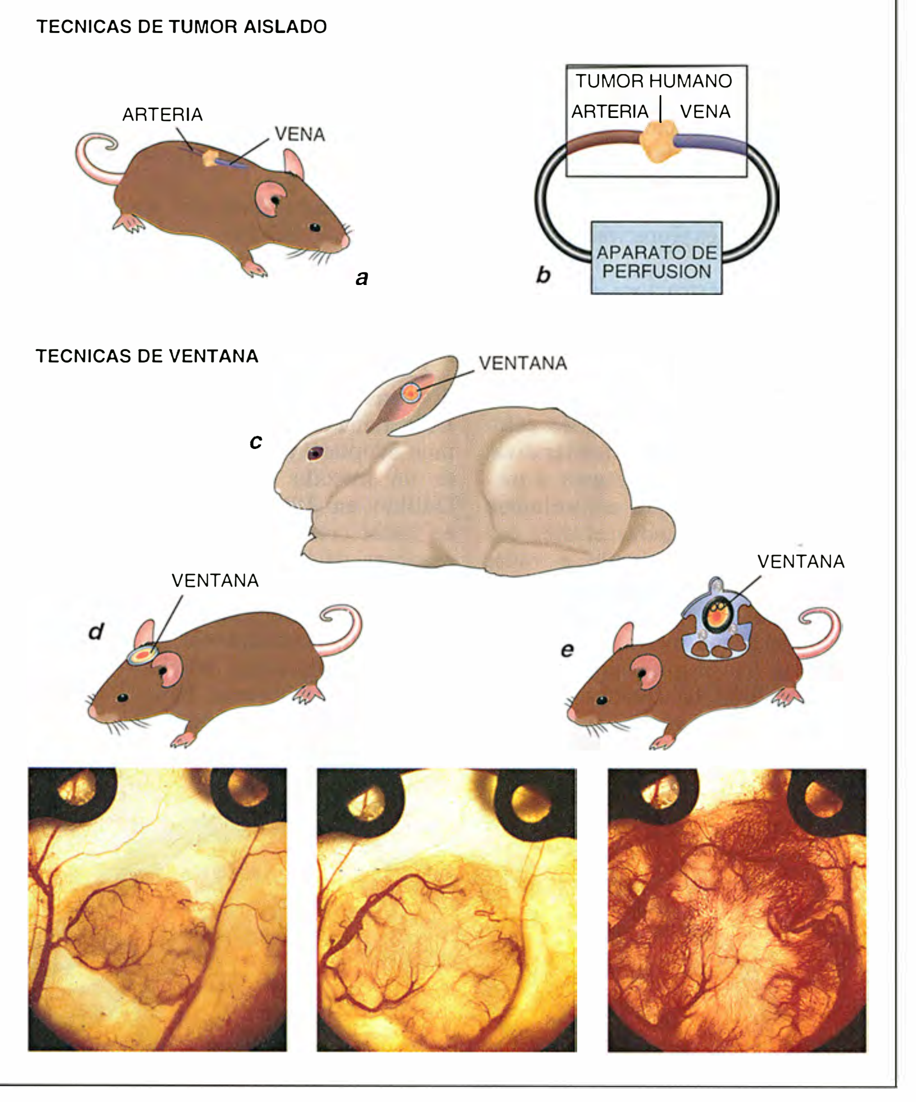
Cómo se hacen los experimentos

Dos son los métodos experimentales básicos que utilizamos para determinar el destino de los fármacos que llegan a los tumores.

En las técnicas de "tumor aislado" implantamos en un roedor un tumor al que llega una sola arteria y lo drena una sola vena (*a*), aunque en algunas ocasiones obtenemos ese tumor de un paciente y mantenemos artificialmente el flujo de sangre (*b*). Medimos la cantidad de fármaco que entra y sale del tumor y calculamos la cantidad absorbida.

En las técnicas de "ventana", hacemos crecer un tumor en la oreja de un conejo (*c*), o en el cerebro (*d*) o en la piel del dorso (*e*) de un roedor y colocamos una placa de vidrio sobre el tumor. Enfocando el microscopio sobre el tejido visible, se pueden observar directamente fenómenos como el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos y la difusión de un medicamento.

Las fotografías siguen los cambios que se produjeron entre los días 5 y 20 (*de izquierda a derecha*) tras el implante de células cancerosas en la piel del dorso de un roedor. Hacia el día 20, la periferia del tumor resultante ha adquirido una maraña de vasos sanguíneos, pero la zona del centro queda bastante desprovista de ellos (*área blanca*). El centro del tumor carece de los vasos necesarios para que los fármacos transportados por la sangre llegaran directamente hasta allí.



los tumores continúa siendo en cierto modo una "caja negra". Para obtener datos más detallados acerca del flujo sanguíneo y de la distribución de los fármacos y otras sustancias por el tumor, aplicamos versiones modificadas de técnicas de "ventana", cuyo uso con el conejo introdujo J. Calvin Sandison, de la Universidad de Pennsylvania, en los años veinte, y que Glenn H. Algire, del Instituto Nacional del Cáncer, aplicó al ratón en los años cuarenta.

Implantamos células tumorales en la oreja de un conejo, o en el cerebro de un roedor o en la piel de su dorso. Las cubrimos después con una placa de vidrio transparente o las colocamos entre dos cubreobjetos. A medida que el tumor crece contra el vidrio, podemos observarlo con un microscopio. La unión de marcadores fluorescentes a los compuestos inyectados nos permite seguir su pista al pasar por el tumor. La utilización de ratones inmunodeficientes, posible desde 1991, nos ha permitido inspeccionar visualmente tumores no sólo de origen animal, sino también humano. (La carencia de sistema inmunitario evita que el ratón rechace los injertos humanos.) La utilización de modelos matemáticos, un método clásico de la ingeniería, nos está ayudando también en nuestras investigaciones. Podemos así combinar teoría y experimentación para formular y poner a prueba predicciones, utilizando el mínimo posible de animales en nuestros experimentos.

Muy pronto, nuestro trabajo y el de otros puso de manifiesto que el sistema vascular de los tumores puede estar muy desorganizado, tanto en su estructura como en su funcionamiento. Esta desorganización, a su vez, puede constituir una barrera importante para la penetración del fármaco. En los órganos normales, los vasos sanguíneos están dispuestos de una manera predecible y proporcionan sangre a todas las zonas de los tejidos que los constituyen. Las arterias que llevan la sangre oxigenada del corazón se dividen en arteriolas progresivamente más pequeñas y después en capilares microscópicos. Desde estos capilares, los líquidos, los nutrientes y el oxígeno pasan a la matriz circundante y a las células. Los capilares dan lugar a vénulas, que recogen materiales de desecho y el exceso de líquido del tejido y los conducen hasta las venas para su eliminación.

Aunque los tumores se abastecen inicialmente con la sangre de los vasos ya existentes en la región, acaban produciendo nuevos vasos pequeños, que se ramifican excesivamente, adquieren formas retorcidas y crecen en direcciones difíciles de predecir, cambiantes de un día para otro. Por consiguiente, puede suceder que algunas de las áreas del tumor estén bien vascularizadas, mientras que otras dispongan de un suministro escaso o nulo.

Esto nos indicaba que uno de los primeros problemas con que se encuentra el fármaco que llega por vía sanguínea en su camino hacia las

células cancerosas es el de la distribución desigual de los vasos sanguíneos. A través de nuestras ventanas transparentes podemos apreciar que las regiones que carecen de vasos sanguíneos no reciben fármaco alguno procedente de la circulación. (Las células tumorales de esas áreas escasamente irrigadas pueden parecer muertas a primera vista, pero no es raro que revivan con la llegada de nutrientes.)

Y lo que es más importante, la ramificación y el retorcimiento aberrante de los vasos suelen contribuir a demorar de manera perceptible el flujo sanguíneo, un fenómeno que se exacerba por la viscosidad, fuera de lo común, de la sangre de los tumores. El enlentecimiento del flujo obstaculiza la penetración de los fármacos en las regiones del tumor que tienen un riego escaso, al tiempo que participa en otros problemas relacionados que veremos más adelante.

El riego sanguíneo desigual no es el único obstáculo para que el fármaco penetre en un tumor. Un segundo impedimento se debe a la presión anormalmente elevada que reina en la matriz intersticial (medida como la fuerza que la matriz ejerce sobre una sonda insertada en ella). Esta presión retarda el paso de moléculas grandes a través de la pared de los vasos hacia la matriz intersticial, lo que puede contribuir a la baja concentración de las moléculas de fármaco que frecuentemente se observa (mediante microscopía de fluorescencia o con otras técnicas de captación de imágenes) en la matriz intersticial de tumores de origen animal o humano crecidos en el ratón.

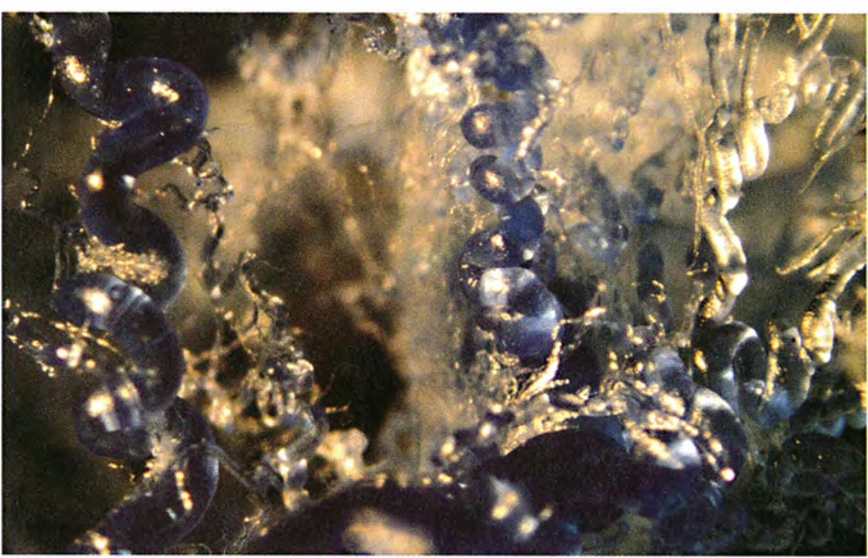
Comenzamos a sospechar que la presión podría dar lugar a problemas en la distribución de los fármacos cuando pudimos examinar más de cerca las fuerzas que controlan el movimiento de las moléculas desde la sangre hasta la matriz. Este paso tiene lugar a través de o entre las células endoteliales, que dispuestas en una sola capa recubren las paredes de los vasos. Ya sabíamos que las moléculas que salen de los vasos sanguíneos (que se extravasan) lo hacen fundamentalmente por dos mecanismos: difusión y convección. (Las células hacen uso de una tercera opción, que comentaré por separado.) La difusión es el movimiento de moléculas desde un área de concentración elevada hacia otra de baja concentración. La convección es el transporte de moléculas por una corriente de líquidos que fluyen. A diferencia de la difusión, que no se ve afectada por los gradientes de presión, la convección depende de ella: los líquidos fluyen desde áreas de presión elevada hacia áreas de menor presión, transportando a su paso las moléculas.

La diferencia entre estos dos procesos puede ilustrarse con un ejemplo sencillo. Cuando una gota de tinta se deja caer en un vaso de agua en reposo, las moléculas de tinta se mueven gradualmente hacia las paredes —por difusión— hasta que se alcanza una concentración uniforme. Sin embargo, si se agita el agua después de haber depositado la gota de tinta, las moléculas de ésta se distribuyen rápidamente, transportadas por el agua agitada y en las direcciones en que ésta se mueve.

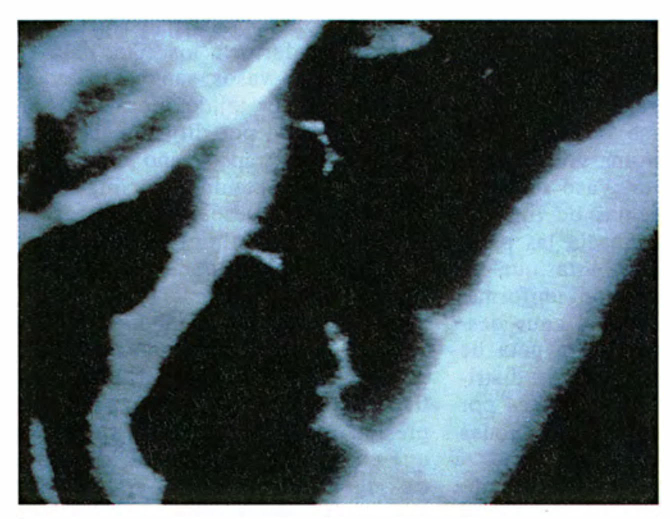
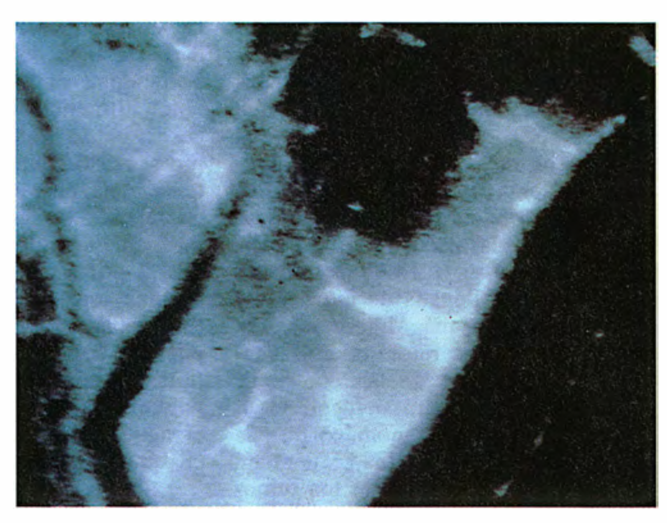
Ya sabíamos también que las moléculas pequeñas, como el oxígeno y los fármacos que se utilizan en la quimioterapia habitual (cuyo peso molecular es inferior a los 2000 dalton), salen de los vasos sanguíneos y se mueven por los tejidos normales fundamentalmente por difusión. Pero las moléculas de gran tamaño —incluidos los fármacos obtenidos por ingeniería genética (con pesos moleculares de más de 5000 dalton)— se mueven fundamentalmente por convección.

En un tejido sano, el movimiento convectivo de las moléculas grandes desde la sangre hacia la matriz intersticial se produce porque la presión en la red capilar es mayor que en el tejido intersticial (donde es casi igual a cero). Pero ¿qué ocurre en los tumores? En 1987 propuse que si la presión intersticial fuese





2. MOLDE DE LOS VASOS SANGUINEOS de un tumor de un cuarto de kilo. Se consiguió mediante la inyección de un polímero azul en el interior de los vasos de un cáncer de colon extirpado quirúrgicamente y la posterior eliminación del resto del tejido. La región de tipo cristalino del molde completo (*lado izquierdo de la imagen superior*) corresponde a un cúmulo caótico de vasos microscópicos; el agujero de su centro coincide con un área carente de riego sanguíneo. El primer plano (*abajo*) presenta una de las muchas anormalidades estructurales de los tumores: algunos de los vasos son tortuosos y se enrollan a modo de sacacorchos, lo que puede contribuir a una perceptible lentitud del flujo sanguíneo.

3. MOLECULAS MARCADAS CON FLUORESCENCIA (*blanco*), fotografiadas poco después de su penetración en los pequeños vasos sanguíneos de la periferia del tumor (*izquierda*) y, posteriormente, una vez que han comenzado a salir hacia la matriz intersticial que rodea los vasos (*derecha*). Las moléculas pudieron atravesar las paredes de algunos vasos pero no las de otros, como la pared derecha del vaso que marca el límite derecho de la zona fluorescente. También se abrieron paso por algunas partes de la matriz pero no por otras, como la región negra situada arriba. Las diferencias son en gran parte resultado de la variabilidad presentada por la porosidad de los vasos y de la matriz periféricos.

anormalmente elevada en los tumores sólidos, resultaría dificultado el paso convectivo de las moléculas grandes. Algunas de ellas conseguirían entrar en la matriz por difusión, pero no tan rápidamente, porque la velocidad de este tipo de movimiento disminuye a medida que aumenta el tamaño.

Para comenzar a probar esta hipótesis, nos dispusimos a determinar si la presión intersticial en los tumores humanos era realmente elevada. Dos datos previos apoyaban esta posibilidad. En primer lugar, una revisión de la bibliografía nos permitió averiguar que en 1950 J. S. Young y sus colaboradores de la Universidad de Aberdeen habían medido la presión intersticial en la región central de tumores de conejo trasplantados a otro conejo; la presión en los tumores era mayor que en los tejidos normales. Otros grupos habían publicado posteriormente resultados parecidos. La importancia que estos datos pudieran tener en relación con los tumores espontáneos que se dan en el hombre no estaba, sin embargo, clara, por lo que esos descubrimientos permanecieron en gran medida ignorados.

En segundo lugar, cuando desarrollamos en 1988 un modelo matemático de la distribución de la presión en el interior de tumores sólidos, el modelo sugería que la presión habría de ser alta. Es más, la predicción era sorprendente, pues nos decía que la presión sería igualmente elevada en toda la masa del tumor, descendiendo de manera abrupta en el borde hasta un valor cercano a cero, como el del tejido normal circundante.

Tal perfil de presión uniformemente elevado nos sorprendió, pues casi todos los demás parámetros, cuya medida en los tumores ya se había realizado (o se ha hecho a partir de entonces), carecen de esa uniformidad. No sólo es desigual la distribución de los vasos sanguíneos, que además es cambiante, sino que también el flujo es variable con el tiempo, incluso en el mismo vaso. Además, algunos vasos son extraordinariamente porosos, o permeables, mientras que otros no lo son. Y un mismo vaso puede ser anormalmente permeable en una región y relativamente impermeable en otra.

En la bibliografía no existía ningún dato experimental que pudiera confirmar o refutar las predicciones del modelo, y por eso uno de mis colaboradores emprendió la tarea de medir la presión intersticial en los diversos puntos de la masa tumoral. Confirmando las predicciones, encontró que la presión en tumores sólidos grandes (los de más de un centímetro de diámetro) era uniformemente elevada en cualquiera de los puntos, con la excepción de los situados en la zona más externa. Otros laboratorios han ratificado estos resultados en animales. Desde 1990 hemos colaborado con médicos de la Universidad de Pittsburgh, de la Universidad de Munich y del Hospital General de Massachusetts en la medición de presiones en tumores sólidos de pacientes sometidos a tratamiento. Las presiones eran tan altas como las que se encontraban en los tumores animales, y en ocasiones más altas aún.

Parte de la hipótesis de 1987 se halla, pues, confirmada: la presión intersticial en los tumores humanos de gran tamaño es anormalmente elevada. Pero ¿basta esta elevación para alterar seriamente el flujo convectivo de moléculas de fármacos de gran tamaño? Es decir, ¿es la presión en el tejido intersticial igual o mayor que la presión en la red microvascular? La respuesta de nuestro modelo matemático era que habrían de ser casi iguales. Mediciones simultáneas de las presiones intersticial y microvascular en los tumores animales han confirmado esta predicción. Tales mediciones indican también que la presión en los vasos del tumor es mayor que en los capilares normales. Nosotros pensamos que esta elevación se debe fundamentalmente a la compresión directa e indirecta de los vasos por las células proliferantes. Al parecer, la desusada arquitectura de la vasculatura y la elevada viscosidad de la sangre en el seno de los tumores contribuyen también a ello.

Considerados en su conjunto, los datos experimentales y teóricos encajan muy bien en el cuadro del desarrollo de barreras de presión que obstaculizan la acumulación de los fármacos en la matriz intersticial, que pasamos a describir. En sus estadios iniciales el tumor crece en el seno de un tejido normal y hace uso de la vasculatura existente. En esas etapas, las presiones intersticial y vascular son relativamente bajas y el tumor se apoya en el sistema linfático existente para drenar el exceso de líquido de la matriz intersticial. A medida que crece, forma nuevos vasos, a menudo permeables, pero

es incapaz de formar su propio sistema linfático. Mientras tanto, la geometría anormal de los vasos sanguíneos demora el flujo a su través. Este enlentecimiento, combinado con la compresión que generan las células tumorales y otros factores, eleva la presión en los vasos. Se produce una salida abundante de líquido desde ellos hacia la matriz y, en ausencia de un sistema linfático funcional, no se drena adecuadamente.

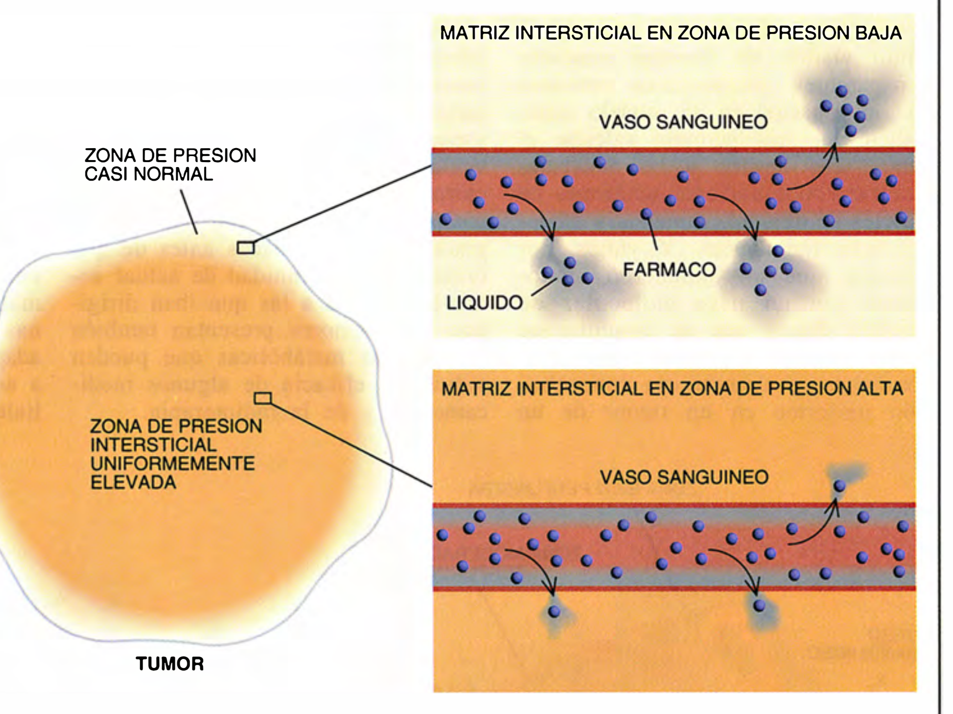
A medida que el líquido se acumula en la matriz intersticial, la presión se eleva en ésta y acaba igualándose con la de los vasos. En ese momento, las moléculas pequeñas que transporta la sangre continúan escapándose fácilmente por difusión (aunque sólo en aquellas áreas que aún disponen de aporte sanguíneo). Pero las moléculas de mayor tamaño permanecen a menudo confinadas en el interior de los vasos sanguíneos, excepto en la periferia, donde la presión intersticial es cercana a la normal. Algunas moléculas grandes pasan hacia la matriz intersticial por difusión, pero lo hacen muy lentamente. De ahí que el organismo pueda eliminar la mayoría de ellas de la circulación antes de que se acumulen en concentraciones óptimas en el seno de la masa tumoral.

Las dificultades con las que se enfrentan los agentes terapéuticos persisten, incluso, después de que se hayan abierto paso hacia la matriz intersticial. Para ser totalmente eficaces, tienen que diseminarse por la matriz y llegar hasta aquellas células no nutridas directamente por los vasos sanguíneos. Las moléculas pequeñas hacen ese recorrido con bastante facilidad (por difusión), si no se degradan o las reabsorben los vasos microscópicos o les frenan otros procesos. Pero las moléculas de gran tamaño, dependientes del proceso de convección, se encuentran con una mayor dificultad; la presión uniforme en la mayor parte del interior del tumor hace inoperante la convección.

Por ironías del destino, la convección funciona en la periferia, aunque, por desgracia, en el sentido inadecuado. Recordemos que la presión cae bruscamente en los márgenes del tumor, donde sus valores se aproximan a los del tejido normal circundante. En consecuencia, el líquido fluye desde la zona de alta presión hacia la periferia alejándose del tumor. Gullino determinó en 1974 la magnitud de este movimiento. Vio que aproximadamente el 10 por ciento de la sangre que sale del tumor rezuma hacia la periferia en vez de drenarse por una vena, y así se ha confirmado posteriormente. El líquido que se escapa de la superficie del tumor arrastra lógicamente hacia afuera moléculas del fármaco, alejándolas de su objetivo.

La presión y los tumores humanos

La presión en el tejido intersticial de los tumores sólidos es elevada en general (*arriba a la izquierda*), excepto en las zonas periféricas más externas, donde cae de manera brusca. La presión elevada del interior puede impedir el movimiento de las moléculas de gran tamaño hacia la matriz intersticial desde la sangre por la sencilla razón de que se mueven fundamentalmente por convección, es decir, llevadas por el líquido desde una región de presión alta a otra de presión baja. En la zona más externa (*detalle superior*), la presión vascular es mayor que la de la matriz intersticial, y por eso los líquidos que forman parte de la sangre (*gris*), cargados de moléculas de fármaco (*azul*), se filtran (*flechas*) hacia la matriz intersticial. En la zona más interna (*detalle inferior*), la presión intersticial es casi igual a la del interior de los vasos sanguíneos; de ahí que cese casi por completo la convección. La elevada presión interior, predicha por un modelo matemático, se ha confirmado recientemente tanto en el hombre (*tabla*) como en animales. Las cifras indican los valores de la presión expresada en milímetros de mercurio.



PRESION INTERSTICIAL EN TUMORES HUMANOS

TIPO DE TEJIDO	NUMERO DE PACIENTES	PRESION MEDIA
MAMA NORMAL	8	0.0
PIEL NORMAL	5	0.4
HIPERNEFROMA	1	38.0
CARCINOMA CERVICAL	26	22.8
METASTASIS HEPATICAS DE CANCER COLORRECTAL	8	21.0
CARCINOMAS DE CABEZA Y CUELLO	27	19.0
CARCINOMA DE MAMA	8	15.0
MELANOMA METASTATICO	12	14.3
CARCINOMA DE PULMON	26	10.0

Para las moléculas que quedan en la matriz intersticial, el proceso de difusión, a menudo lento, es el único medio disponible para dispersarse hacia zonas escasamente perfundidas. En términos matemáticos, el tiempo necesario para recorrer por difusión una determinada distancia es proporcional al cuadrado de la distancia. Es decir, si una molécula tarda un minuto en recorrer un micrómetro, la misma molécula necesitará cuatro minutos (2^2) para desplazarse a lo largo de dos micrómetros y 16 minutos (4^2) para recorrer cuatro micrómetros. En contraste, el tiempo necesario para desplazarse por convección, si ésta actuase, sería sólo directamente proporcional a la distancia.

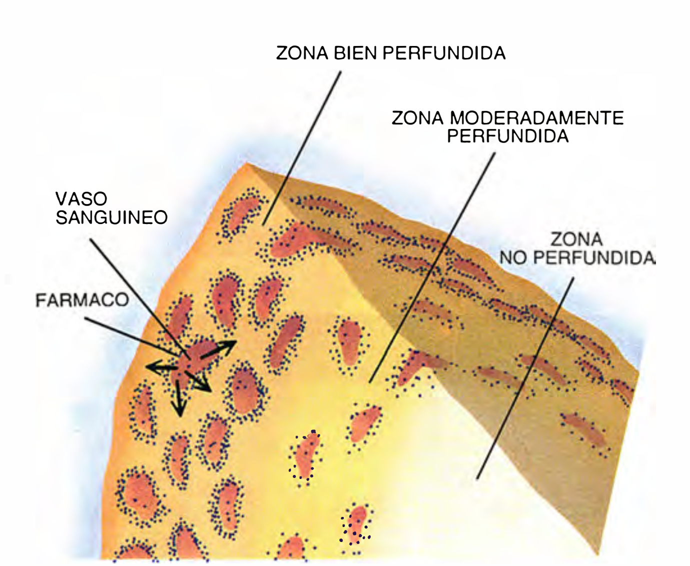
¿Cuánto tiempo podría costarles a las macromoléculas situadas en la periferia de un tumor alcanzar el centro de éste mediante el proceso de difusión? Para acercarnos a la respuesta, inyectamos moléculas de diferentes tamaños, formas y distribución de carga en los animales y medimos el tiempo que tardaban en atravesar el tejido visible en nuestras ventanas transparentes. Introdujimos entonces esta información en un modelo matemático que nos permitía calcular el tiempo que llevaría a las moléculas alcanzar concentraciones uniformes en tumores de distintos tamaños y características fisiológicas. Y vimos, por ejemplo, que un anticuerpo monoclonal con un peso molecular de 150.000 dalton que se administrase de manera continua podría tardar varios meses en alcanzar una concentración uniforme en un tumor de un centímetro de radio y que careciera de riego sanguíneo en su centro.

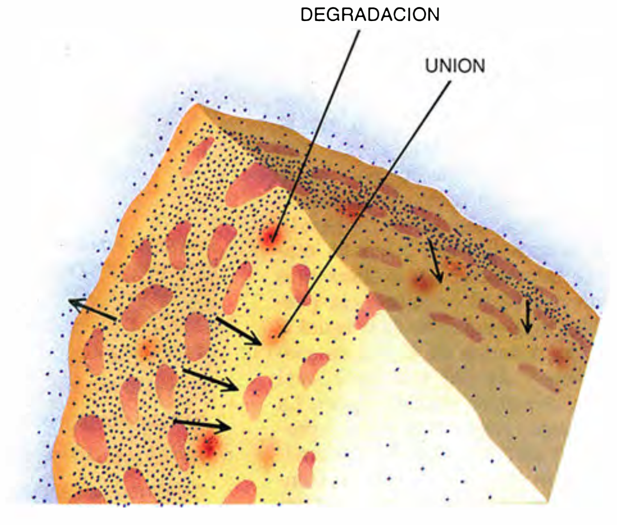
Una diseminación tan lenta podría obstaculizar la capacidad de las macromoléculas, incluidos los nuevos fármacos obtenidos por ingeniería genética, para erradicar tumores. Los compuestos transportados por la sangre no sobreviven en ésta por tiempo indefinido. Habría que administrar, por tanto, dosis repetidas para mantener concentraciones elevadas en la sangre durante todo el tiempo que fuera necesario hasta conseguir la penetración completa del tumor. El suministro continuado no sólo sería caro, sino que podría ser nocivo para algunos tejidos normales que captasen el fármaco. La administración de dosis repetidas podría dar lugar también a que el sistema inmunitario sintetizara anticuerpos y otras sustancias que degradasen el fármaco antes de que éste alcanzase su efecto máximo.

También estudiamos impedimentos adicionales al paso hacia el espacio intersticial. Como resultado de ello sabemos que muchos de los fármacos obtenidos por ingeniería genética son adhesivos; esta propiedad frena su velocidad de difusión, de manera semejante a como unas zapatillas con suelas pegajosas serían una seria desventaja para quien participara en una carrera. Además, algunas enzimas del compartimento intersticial podrían degradar ciertos fármacos antes de que tuviesen la oportunidad de actuar sobre las células a las que iban dirigidos. Los tumores presentan también alteraciones metabólicas que pueden reducir la eficacia de algunos medicamentos y de la radioterapia.

No deja de ser curioso el hecho de que los mismos factores que actúan como impedimentos de la penetración puedan resultar en ocasiones beneficiosos. Por ejemplo, la adhesividad puede ayudar a retener un fármaco en el tumor. Y hay otros que ejercen mejor su función en un medio ácido o hipóxico. Además, si un compuesto consigue superar la variedad de barreras y logra acumularse en una zona de escasa vascularización, la carencia de riego sanguíneo se convierte en una ventaja, pues, dado que tiene tan pocas vías para escapar, puede actuar como depósito que lo libere lentamente hacia otras zonas tumorales vecinas.

Determinadas barreras con las que se enfrentan las moléculas del fármaco pueden obstaculizar también la entrada de leucocitos de la sangre, que se administran como armas antitumorales. El riego sanguíneo de los tumores, tan heterogéneo, constituye, en efecto, una de sus barreras fundamentales, al igual que lo es para las moléculas. En la actualidad seguimos intentando determinar hasta qué punto los tumores resisten la extravasación y la migración intersticial de los leucocitos. La capacidad de las células para salir de la circulación puede depender menos de los gradientes de presión que de su capacidad de unirse a las células endoteliales de las paredes de los vasos y de deformarse de manera que puedan aumentar sus zonas de contacto con la pared. Estas adaptaciones de las células las ayudan a escurrirse entre las células endoteliales y salir así del sistema vascular.





4. SEGMENTO DE UN TUMOR, que incluye zonas bien perfundidas, moderadamente perfundidas y no perfundidas (*izquierda*); un tumor puede contener muchas zonas heterogéneas como éstas. Las moléculas de fármaco (*azul*) que desde los vasos (*rojo*) alcanzan la matriz intersticial intentan difundirse inmediatamente desde las zonas bien perfundidas a las zonas escasamente perfundidas, zonas de baja concentración (*flechas negras en la imagen de la derecha*). Pero muchas de ellas nunca completan el viaje. Algunas son arrastradas hacia afuera por el líquido que rezuma en las zonas periféricas (*flecha gris*).

Una vez se encuentran en la matriz intersticial, las células emigran agarrándose a la matriz y reptando a través de ella. La eficacia de estos movimientos está de nuevo influida por las propiedades adhesivas de las células y por su capacidad de cambiar de forma, así como por otras características diversas del tejido tumoral. Hace falta seguir estudiando estos procesos.

Si, como indican nuestros datos, los obstáculos a la dispersión de los fármacos en los tumores pueden ser tan enormes, ¿qué podría hacerse para obviarlos o eliminarlos? Hasta el momento no se ha conseguido dar con las soluciones perfectas, aunque sí se han propuesto enfoques que despiertan grandes esperanzas. Como siempre, el diagnóstico y el tratamiento precoz pueden ser beneficiosos. Si se comparan con los tumores ya consolidados, los de pequeño tamaño tienden a tener un sistema circulatorio más uniforme y una presión intersticial menor, por lo que tanto los fármacos nuevos como los tradicionales deberían encontrar menos dificultades para penetrar en ellos.

En el caso de los grandes, se estudian actualmente varios enfoques. Conforme a uno de ellos, un anticuerpo que se une selectivamente a algún constituyente del tumor se vincula a una enzima para formar lo que se llama una abzima. La enzima elegida ha de ser tal que carezca de efectos perceptibles en el organismo, pero capaz de convertir la forma inactiva de una determinada molécula de pequeño tamaño (un profármaco) en un agente antitumoral. Se inyecta en la sangre una dosis elevada de abzima de modo que pueda acumularse en el tumor a pesar de la lentitud de la extravasación y de la difusión intersticial. Así pueden utilizarse dosis elevadas, porque ni el anticuerpo ni el componente de naturaleza enzimática causan efectos nocivos apreciables en el tejido normal. Tras ello, y después de eliminada de los tejidos y de la circulación sistémica, se inyecta el profármaco. Como tiene un tamaño pequeño, se difunde fácilmente desde los vasos que riegan el tumor y, ya en la matriz intersticial, al encontrarse con la abzima, se activa y se abre paso por la masa tumoral destruyendo las células malignas.

Otro enfoque para evitar las barreras que se oponen a la dispersión consiste en inyectar al paciente liposomas (vesículas lipídicas) cuyo interior va lleno de un fármaco de bajo peso molecular. Los liposomas que se elaboran actualmente persisten durante bastante tiempo en la sangre. Pueden así salir por las zonas más permeables de los vasos y alcanzar niveles elevados en la matriz intersticial circundante. Una vez allí, deben liberar el medicamento de forma gradual, permitiendo su dispersión por el tumor.

Las estrategias basadas en la utilización de abzimas y liposomas, al igual que otras que explotan el uso de moléculas pequeñas, tienen, sin embargo, su talón de Aquiles. Como ya se ha mencionado, las moléculas pequeñas pueden degradarse con gran rapidez. Y pueden difundirse de nuevo hacia los vasos con la misma facilidad con que salieron de ellos, abandonando el tumor antes de haber cumplido con su misión de destruir las células malignas.

Pero el objetivo no debería limitarse a resolver el problema de que el fármaco llegue a su destino evadiendo barreras, sino también la manera de eliminarlas. Para ser más precisos, los investigadores tendrían que conseguir un aumento de la perfusión en áreas escasamente vascularizadas, un aumento de la permeabilidad de los vasos del tumor, una reducción de la presión intersticial y un aumento de la velocidad del transporte en la matriz intersticial. Por desgracia, son muy pocos los laboratorios dedicados a este tema, por lo que los resultados obtenidos no son muy abundantes.

Sin embargo, ya se han producido algunos avances; sobre todo, se ha conseguido reducir la presión intersticial, como recientemente hemos comprobado que hacen, por ejemplo, la pentoxifilina y la nicotinamida en tumores humanos crecidos en animales. También se sabe que estos agentes aumentan el suministro de oxígeno en diversos tumores, lo que representa un beneficio para la radioterapia. Se ha observado que la irradiación del cáncer cervical femenino hace descender en ocasiones la presión intersticial. Queda por comprobar si ese tipo de tratamiento mejorará también la captación de fármacos en los tumores de estas pacientes. Algunos estudios aparecidos en publicaciones científicas muestran que después de irradiar tumores humanos que se han hecho crecer en animales se fomenta la acumulación de anticuerpos inyectados.

Otro tratamiento relacionado con la presión combate tumores confinados a una región. Para ello se mezcla un fármaco con una gran cantidad de líquido y se inyecta directamente en el centro del tumor, aumentando así la presión en relación con el tejido circundante. Por tanto, el fármaco se extenderá por convección según el gradiente de la presión inducida, desde el centro hacia la periferia. Este mismo enfoque se está ensayando en la actualidad en tumores del cerebro y de otras partes del cuerpo.

Por otro lado, si se consiguiera destruir por completo el sistema vascular de un tumor, no habría necesidad de que un fármaco se extravasara para salvar la barrera de la matriz intersticial. Parece lógico que la eliminación completa de la llegada de nutrientes acabase destruyendo las células tumorales. Cierto número de fármacos —entre ellos el factor de necrosis tumoral y los anticuerpos monoclonales que reconocen las células endoteliales o la matriz subendotelial— poseen el potencial de cerrar por completo el paso de la sangre hacia el tumor. Si se dan algunas condiciones, la termoterapia y la terapia fotodinámica pueden también alterar la vasculatura.

Los leucocitos, con los que se están realizando pruebas para el tratamiento de pacientes con algunos tipos de tumores, podrían ser también útiles en terapias antivasculares. Hemos visto recientemente que las células LAK se adhieren a los vasos del tumor y alteran el flujo sanguíneo. Este hecho concuerda con la idea de que, cuando las células resultan útiles para el paciente, lo son en parte por interferir con el riego sanguíneo del tumor. Así pues, la toxicidad para las células del tumor puede no ser el único efecto que las células LAK produzcan en el organismo. Esto implica también que la combinación de las terapias antivasculares con otras dirigidas contra las propias células del tumor podría incrementar la efectividad de ambos tipos de tratamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRANSPORT OF MOLECULES ACROSS TUMOR VASCULATURE. R. K. Jain en *Cancer and Metastasis Reviews*, vol. 6, n.º 4, páginas 559-593; 1987.

TRANSPORT OF MOLECULES IN THE TUMOR INTERSTITIUM: A REVIEW. R. K. Jain en *Cancer Research*, vol. 47, n.º 12, páginas 3039-3051; 15 de junio de 1987.

DETERMINANTS OF TUMOR BLOOD FLOW: A REVIEW. R. K. Jain en *Cancer Research*, vol. 48, n.º 10, págs. 2641-2658; 15 de mayo de 1988.

PHYSIOLOGICAL RESISTANCE TO THE TREATMENT OF SOLID TUMORS. R. K. Jain en *Drug Resistance in Oncology*. Dirigido por Beverly A. Teicher. Marcel Dekker, 1993.

Los manatíes

Estos gigantescos ramoneadores acuáticos aventajaron a sus rivales del Nuevo Mundo. Ahora no tienen otro enemigo que los seres humanos, de quienes depende su supervivencia

Thomas J. O'Shea

Había una vez una joven doncella que se estaba bañando en las orillas de un río. Sorprendida al ver a unos hombres que se acercaban, se lanzó al río, cubriendo su trasero con un abanico. La timidez la condenó así a una vida en el agua: la doncella se convirtió en un manatí, metamorfoseándose el abanico en su cola espatulada distintiva.

Así lo cuenta una leyenda de Mali, en Africa occidental, que curiosamente se hace eco de los orígenes de los manatíes como mamíferos que abandonaron la tierra para vivir en mares y ríos. Aunque hay muchísimos relatos que hablan de los manatíes en las culturas indígenas africanas y americanas, la investigación sobre ellos está empezando ahora a desvelar sus secretos. Entre sus adaptaciones únicas a una vida de herbívoros marinos se cuentan un suministro inacabable de dientes (con los nuevos sustituyendo a los desgastados) y una tasa metabólica anormalmente baja, que les permite ayunar durante períodos de hasta siete meses. Pesados y lentos, los manatíes tienen como único enemigo a los seres humanos.

Los manatíes son mamíferos pertenecientes al orden Sirenios, así llamados porque (al menos para algunos observadores) se parecían a sirenas. Los sirenios acuáticos surgieron probablemente en el Viejo Mundo; sus antecesores eran animales terrestres que también dieron origen a los elefantes, los hiracoideos y quizás a los cerdos hormigueros. No sabemos qué fuerzas de la selección natural condujeron a un antiguo mamífero a explotar el nicho de un gran herbívoro marino, aunque los inicios de esta estrategia ecológica pueden verse todavía en la actualidad. Las ovejas domésticas de las islas situadas frente a Escocia ramonean algas marinas en la zona intermareal, e incluso nadan de un grupo de algas a otro; los cerdos de las islas Tokelau, en el Pacífico sur, suelen ramonear a lo largo de los arrecifes de coral, y vadean con la cabeza sumergida.

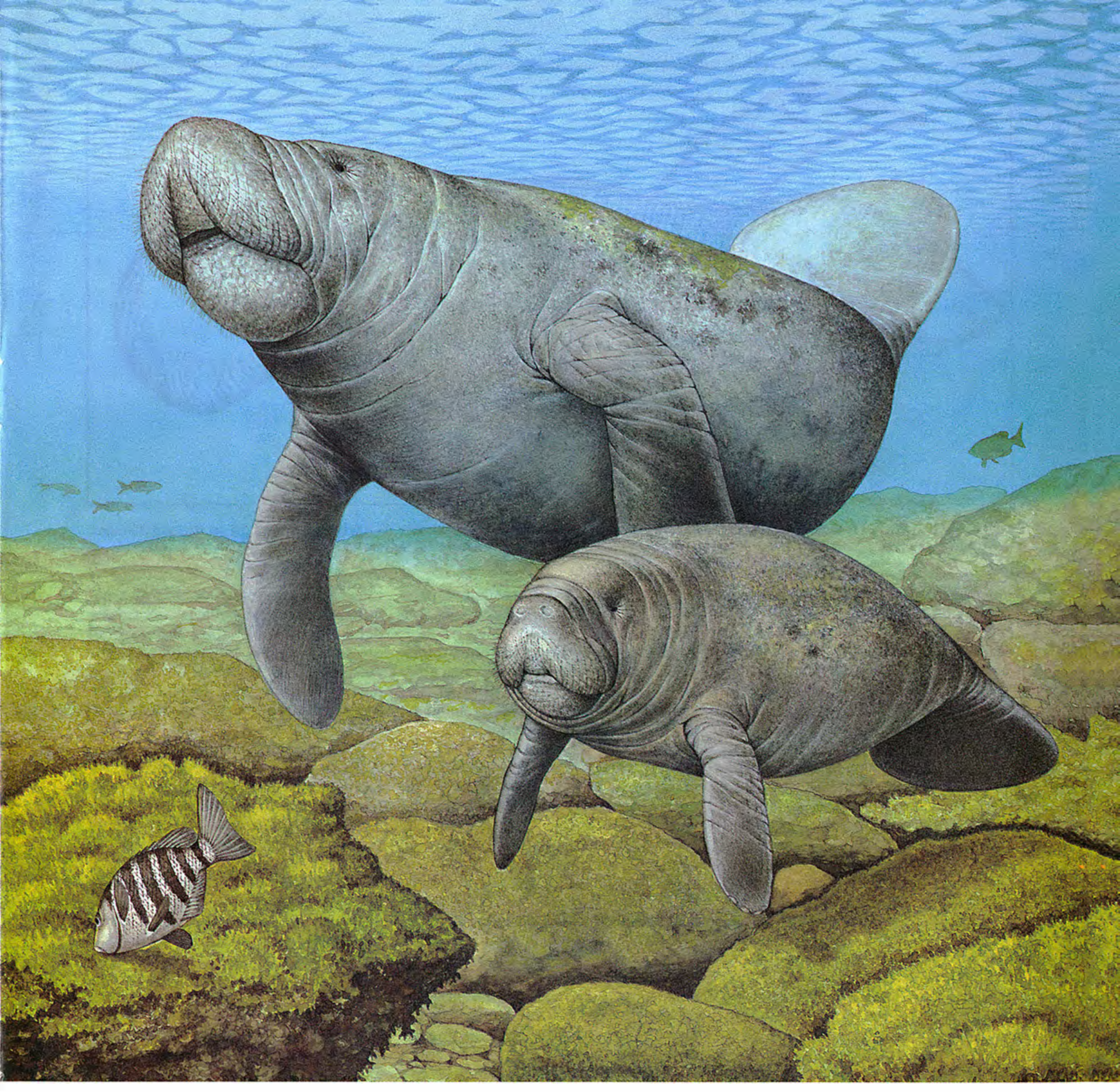
Los datos fósiles hacen pensar que los sirenios del Viejo Mundo alcanzaron una Sudamérica aislada en el Eoceno o el Oligoceno, hace más de 35 millones de años. El manatí verdadero más antiguo que se conoce (que, sin embargo, carecía de la tecnología dental de los manatíes modernos) vivió en el Mioceno medio, hace de 13 a 16 millones de años. El orden Sirenios incluye en la actualidad tres especies de manatíes de la familia Triquéquidos, más su pariente más viejo, el dugón, de la familia Dugóngidos. Un segundo dugóngido, la vaca marina de Steller, descubierto en 1741, fue cazado hasta ocasionar su extinción en un plazo de unos veinticinco años.

Hasta el Mioceno tardío, los dugóngidos, que explotaban praderas de fanerógamas marinas, colonizaron las aguas marinas del Atlántico occidental y del Caribe. Los manatíes, aunque comían tanto plantas dulceacuícolas como marinas, se hallaban restringidos a los ríos y estuarios de Sudamérica. En la actualidad, a los dugones sólo se les encuentra en las partes cálidas y someras del océano Indico y del Pacífico occidental. Es claro que los animales fueron desplazados hace aproximadamente un millón de años por advenedizos manatíes del Nuevo Mundo que, como afirma de manera convincente Daryl P. Domning, paleontóloga de la Universidad de Howard, eran más eficaces en la masticación que sus primitivos parientes.

Las proezas masticatorias de los manatíes derivan del hecho de que nunca se quedan sin dientes. Sólo tienen premolares y molares (una fila a cada lado de la mandíbula), pero éstos son sustituidos continuamente por nuevos dientes que brotan en la parte posterior de la fila (como si fueran muelas del juicio) y se desplazan hacia delante. Los dientes delanteros gastados caen, y el tejido óseo que separa los alvéolos dentarios se descompone continuamente y se vuelve a formar para permitir que los nuevos dientes se desplacen hacia adelante a un ritmo aproximado de uno o dos milímetros al mes. Este proceso tiene lugar a lo largo de toda la vida: incluso los animales más viejos presentan nuevos molares en formación.

Tal adaptación indica un aumento del poder abrasivo de la dieta del manatí en alguna época anterior. Los caballos, por ejemplo, desarrollaron por evolución molares de corona elevada en respuesta a la aparición de las verdaderas hierbas, o gramíneas, que poseen una proporción elevada de sílice, muy abrasivo. En la actualidad, las gramíneas son una parte importante de la dieta de las tres especies de manatíes; en cambio, el alimento básico del dugón, que es exclusivamente marino, son las angiospermas marinas (hierbas marinas). Es probable que ésta fuese tam-

THOMAS J. O'SHEA pertenece a la Inspección Biológica Nacional del Departamento del Interior de los Estados Unidos, y es director adjunto del Centro Nacional de Investigación Ecológica en Fort Collins, Colorado. La biología de la conservación y la mastozoología son sus principales intereses. O'Shea ha estudiado a los manatíes desde 1979, en Florida y en varios países tropicales. Dirigió el proyecto Sirenios del Servicio de Pesca y Vida silvestre de los Estados Unidos durante más de siete años y fue presidente delegado del Grupo de Especialistas en Sirenios de la IUCN-Unión de Conservación Mundial. Profesor asociado adjunto del departamento de Ciencias Ambientales y de la Naturaleza de la Universidad de Florida y conservador adjunto del Museo de Historia Natural de Florida, actúa de asesor científico de la Comisión de Mamíferos Marinos estadounidense.

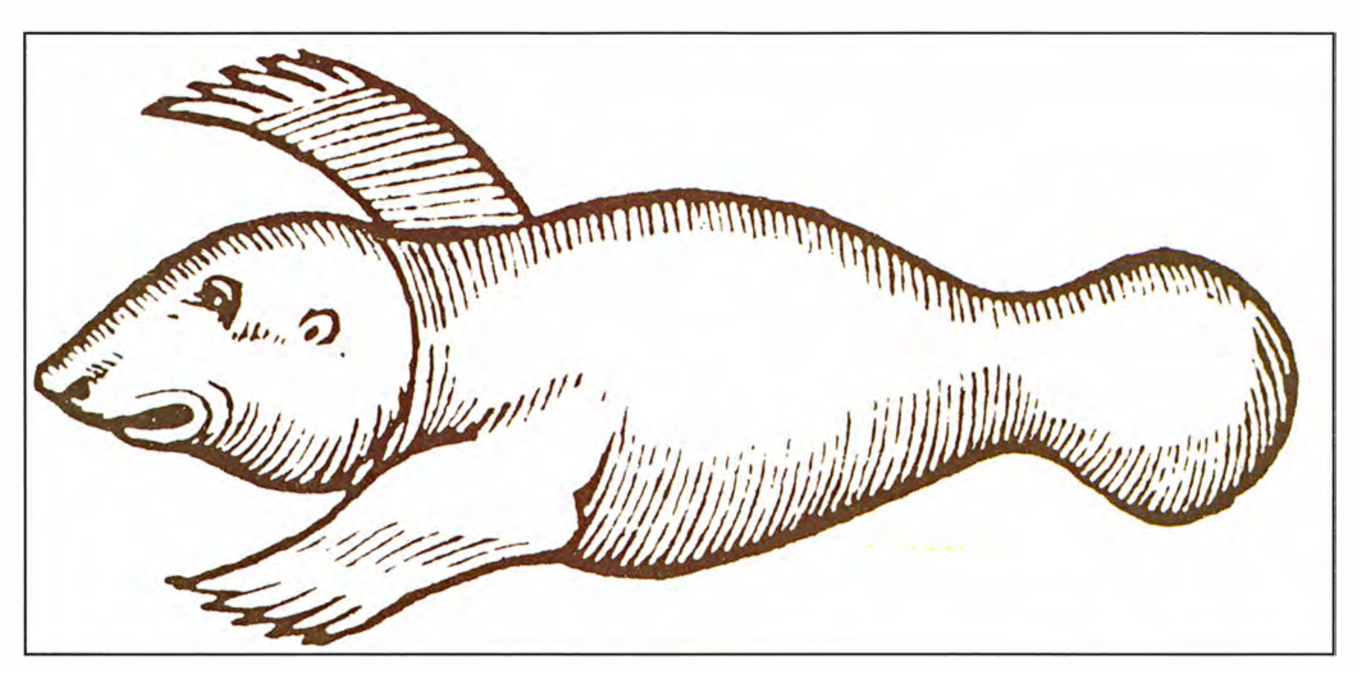


1. UN MANATI DE FLORIDA y su cría nadan indolentes en aguas tranquilas. Las crías permanecen junto a su madre hasta dos años, comunicándose mediante débiles chillidos y aprendiendo las pautas de migración estacionales.

bién la dieta de los antiguos dugóngidos del Caribe.

Domning señala que la invasión generalizada de los ecosistemas sudamericanos por las nuevas gramíneas parece haberse producido en el Mioceno. La glaciación continental de los períodos Plioceno y Pleistoceno hizo descender el nivel del mar y aumentó la erosión y la escorrentía de arena y suelo. Es probable que la deposición de arenas aumentara la cantidad de material abrasivo ingerido con las hierbas marinas. Los triquéquidos, más tolerantes de la arena, invadieron también estos hábitat. Hace aproximadamente un millón de años ya habían ampliado su nicho alimentario para incluir a las angiospermas marinas, y sustituyeron a los dugóngidos en el Atlántico y el Caribe.

En la región amazónica, la orogenia del Mioceno tardío creó una cuenca cerrada efímera; los triquéquidos que se quedaron allí aislados se convirtieron en el manatí del Amazonas *(Trichechus inunguis)*. El manatí de las Antillas *(T. manatus)* parece ser un descendiente poco modificado de triquéquidos costeros sudamericanos de la época Plioceno-Pleistoceno; en la actualidad pueden distinguirse las subespecies de Florida y de las Antillas. Una forma semejante alcanzó también Africa occidental a merced de las corrientes



2. PRIMERA ILUSTRACION conocida de un manatí, procedente de la *Historia general y natural de las Indias* (1535), de Gonzalo Fernández de Oviedo; se basa en la descripción que Colón hizo de los animales.

transoceánicas en época relativamente reciente (quizá después del Plioceno tardío), dando origen al manatí de Africa occidental, *T. senegalensis*.

Los manatíes han tenido una relación prolongada e íntima con los seres humanos, principalmente como alimento. Son animales grandes (una vez pesamos un manatí de Florida que alcanzó los 1460 kilogramos) y han sido cazados y paladeados por los miembros de las culturas ribereñas de todo el Atlántico tropical. En Africa occidental, se atrae a los manatíes a jaulas trampa mediante mandioca, se les alancea desde plataformas colocadas sobre postes, se les captura con redes, se les disparan arpones mediante gatillos conectados a cebos y se les atrapa con cercas en la marea baja. Los indios sudamericanos colocan troncos atravesados en los ríos para atraparlos cuando las aguas se retiran.

Estos animales aparecen también en numerosas supersticiones y leyendas de las culturas indígenas. En Mali, los manatíes del río Níger son considerados espíritus malignos; sólo unos pocos miembros de la tribu conocen los encantamientos adecuados para cazar y matar a un manatí sin morir o volverse loco. Cuando la caza tiene éxito, se distribuyen tajadas de carne en función de la condición social y han de seguirse algunos otros rituales. Si una mujer embarazada come determinadas partes, se cree que el futuro niño corre el peligro de terminar siendo un adulto de moralidad dudosa. De las grasas y de la piel del manatí se hacen remedios para varias enfermedades, y pociones a partir de sus costillas.

Al otro lado del Atlántico, en la cabecera del Amazonas, en Ecuador, un chamán indio de la tribu de los siona nos contó una leyenda sobre el origen del manatí del Amazonas. Un dios antiguo fue engañado y atrapado por un tapir, que le sometió con crueldad al ataque de las pirañas. El dios escapó y, como venganza, condenó a una de las hijas del tapir a vivir para siempre en el agua, en forma de manatí.

Los habitantes de las costas y ríos de América Central, del Caribe y del nordeste de Sudamérica aprecian a los manatíes como alimento y como fuente de medicinas. Hacen falta grandes dosis de astucia y vigor para arponear a los manatíes desde piraguas en el río Orinoco. En consecuencia, los diminutos huesos del oído medio de los manatíes se portan como amuletos mágicos contra el mal y la enfermedad. Sin embargo, los indios piraoa de Venezuela tienen prohibida la caza de manatíes y de delfines fluviales, pues creen que morirán si comen carne de manatí, así como que estos animales son seres humanos embrujados que habitan en ciudades subacuáticas del fondo del Orinoco.

Cristóbal Colón y su tripulación fueron los primeros europeos que vieron manatíes en el Nuevo Mundo, en 1493, considerándolos sirenas, si bien en los decenios siguientes se les conoció un poco mejor. Los indios empleaban cuero de manatí en sus escudos contra los exploradores españoles armados de ballestas. A finales del siglo XVII, William Dampier, el bucanero inglés, alimentaba a sus cuadrillas con barcadas de carne de manatí procedente de Panamá, que le proporcionaban los indios misquitos.

Posteriormente, los manatíes fueron explotados comercialmente, ya fuera como carne de caza fresca para los trabajadores de los puestos fronterizos sudamericanos, ya en forma preparada para su reventa en mercados distantes. Durante los siglos XVII y XVIII se exportaron cargamentos enteros a las Antillas desde Guyana, Surinam y Brasil. Las exportaciones terminaron a finales del siglo XIX, época en la que las poblaciones de manatíes ya se habían reducido mucho. El comercio legal con manatíes del Amazonas continuó en Brasil hasta 1973. A finales de los años cincuenta se llegaron a matar hasta 7.000 anuales.

El final de la explotación comercial coincidió con el aumento de otras amenazas para su supervivencia. A partir de los años setenta se vio que cada vez morían más manatíes en accidentes y en encuentros con artefactos fabricados por el hombre. En los trasmallos sintéticos y baratos, cuyo uso se estaba extendiendo en las pesquerías tropicales, a veces se enredaban manatíes y se ahogaban. Ríos y estuarios se contaminaban y se enturbiaban debido a la deforestación y a la erosión, lo que bloqueaba la luz que las plantas acuáticas necesitan. Los hábitat de

los manatíes se encontraban en peligro, sobre todo en aquellas zonas donde abundan los seres humanos. La inmigración hacia Florida se estima entre 800 y 1000 personas diarias; muchos de los recién llegados se establecen en las áreas costeras, donde se drenan las zonas húmedas, sustituyéndolas por urbanizaciones, con sus canales y puertos deportivos. La calidad del agua se ha reducido; en la bahía de Tampa, el 80 por ciento de las praderas de fanerógamas marinas ha desaparecido en los últimos tiempos. En Florida, las hélices de las embarcaciones les infligen horrendas heridas. Las muertes de manatíes causadas de manera accidental por el hombre se duplicaron durante el decenio de 1980, al aumentar de manera igualmente espectacular el número de embarcaciones que surcaban las aguas.

Resultaba evidente que el manatí necesitaba protección, o de lo contrario pronto se convertiría sólo en leyenda. Sin embargo, se sabía tan poco de sus hábitos y de su hábitat que era difícil formular planes para salvarlo. Los decretos de Protección de Mamíferos Marinos y de Especies Amenazadas estadounidenses significaron por aquella época el inicio de una gran actividad investigadora, que se concentró en Florida.

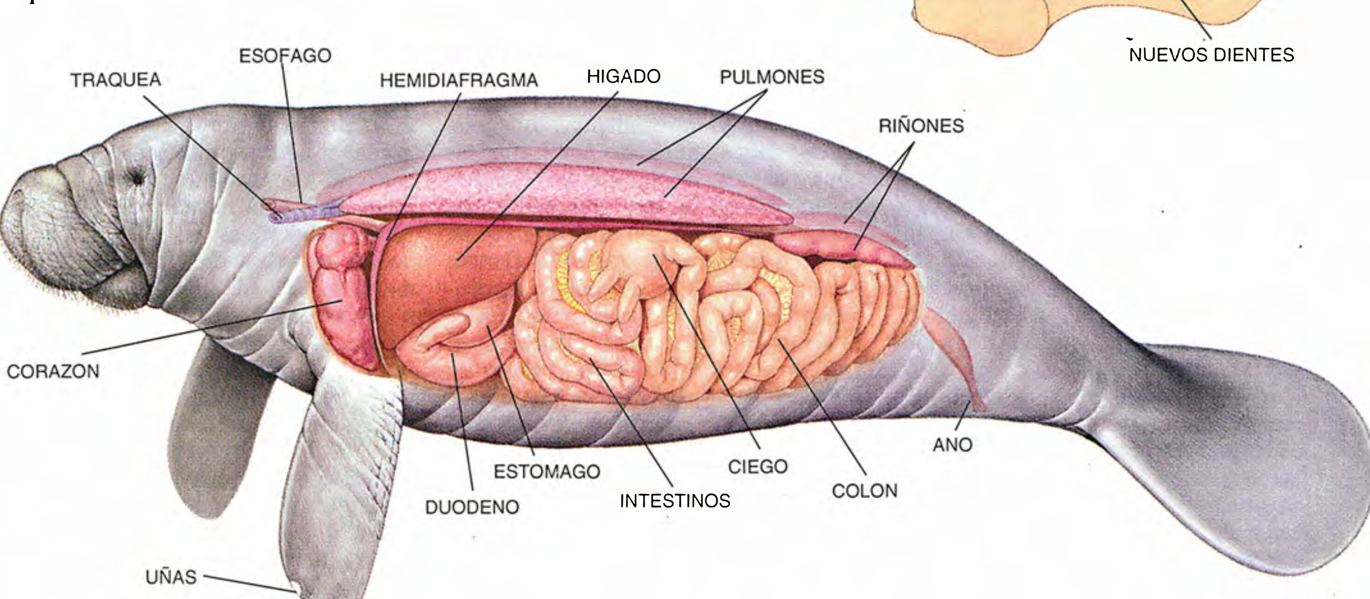
Por lo pronto, los biólogos empezaron a disecar sistemáticamente los cadáveres varados en las playas, con lo que aumentaron los conocimientos sobre su anatomía. Además de reemplazar sus dientes de manera constante, los manatíes han desarrollado otras características que son provechosas para su estilo de vida acuático.

Los pulmones poseen lóbulos simples y están situados por encima de la cavidad abdominal (a lo largo del dorso), lo que permite al animal permanecer horizontalmente bajo el agua. El sistema gastrointestinal es largo y la digestión de la comida se hace en el intestino posterior. Existe asimismo una “glándula cardíaca”, en una bolsa del estómago, que contiene células secretoras especializadas a las que la bolsa protege de la dieta abrasiva.

Los huesos del manatí, pesados y densos, carecen de médula, por lo que le ayudan a permanecer sumergido. Sólo la columna vertebral contiene la médula necesaria para producir los glóbulos rojos de la sangre. El animal puede ajustar su profundidad cambiando el volumen de sus pulmones. Sus labios son grandes, tachonados de cerdas y prensiles, formando una especie de breve trompa. Las aletas, que son largas y en forma de álabe, se emplean para manipular la comida y para andar de puntillas sobre el fondo. El recuento de las capas de crecimiento de los huesos auditivos sugiere que la duración normal de la vida del manatí es de unos 60 años.

El examen de los contenidos estomacales de los manatíes realizado por Catherine A. Beck y sus colegas de la Inspección Biológica Nacional, de Gainesville, Florida, ha permitido saber que su dieta es muy variada. Así, comen la mayoría de las plantas acuáticas locales, al igual que las bellotas de los robles cuyas ramas penden sobre el agua. Por desgracia, su estómago contiene asimismo desperdicios, como plásticos, preservativos, sedales y anzuelos de acero, que a veces les causan la muerte.

También por entonces se empezó a estudiar a manatíes vivos en cautividad, con lo cual se desvelaron algunos hechos misteriosos sobre la tasa a la que los animales consumen energía. La tasa metabólica está relacionada con la cantidad de oxígeno consumida por un mamífero por unidad de tiempo en relación a su peso corporal. La mayoría de las especies consumen energía a tasas que dependen de su tamaño. Por ejemplo, los mamíferos pequeños tienen una gran área superficial para su peso. Puesto que el calor se pierde a través de la superficie y los mamíferos han de gastar energía para mantener una temperatura corporal constante, los pequeños emplean más energía

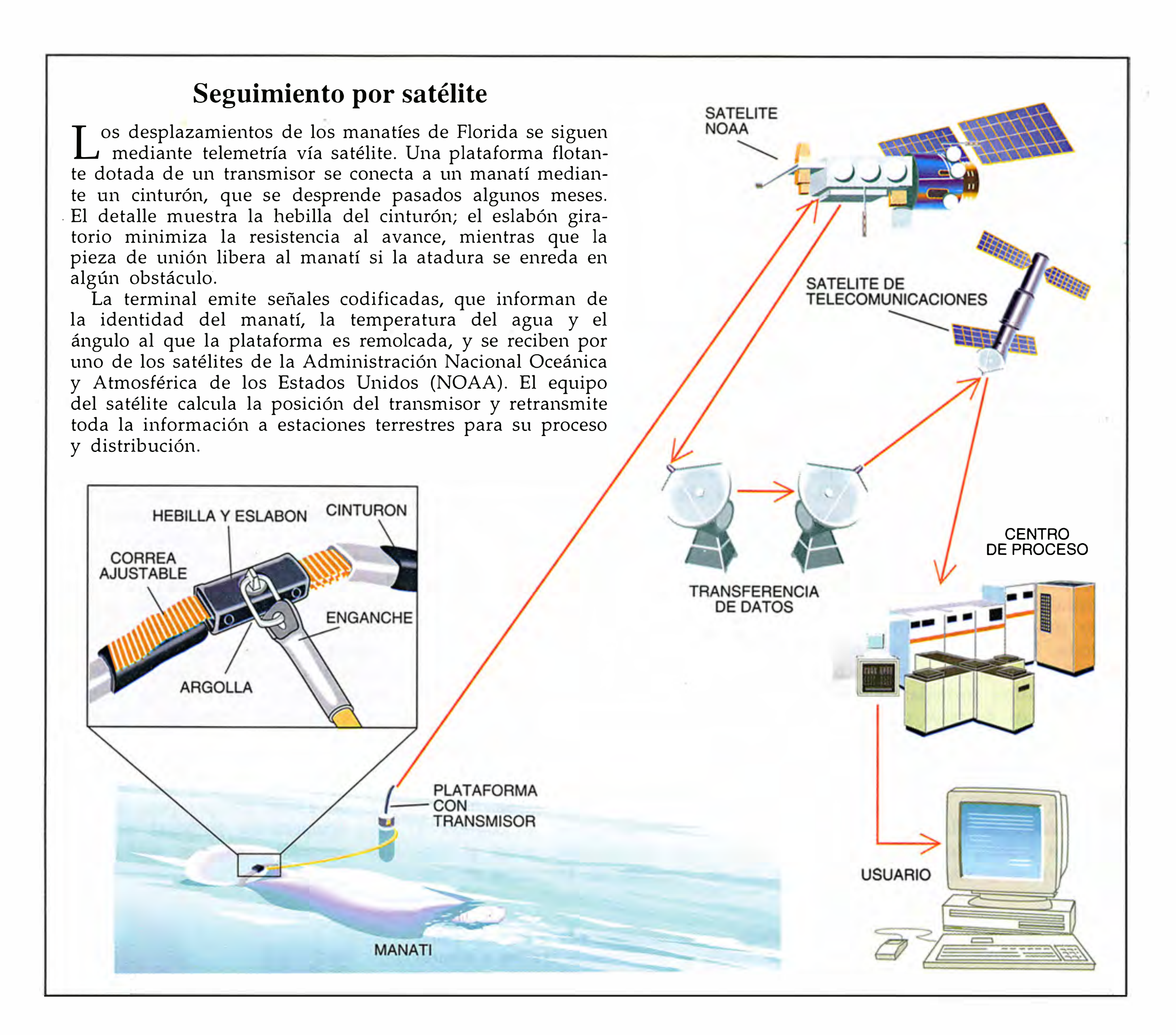


3. LA ANATOMIA DE UN MANATI revela varias adaptaciones a la vida como herbívoro acuático. Los pulmones situados a lo largo del dorso le ayudan a mantenerse horizontal bajo el agua. Las aletas y un labio superior prensil se emplean para manipular la comida. Constantemente se generan nuevas piezas dentales (*derecha*) en la parte posterior de cada fila de dientes, que se van desplazando hacia adelante. Los dientes desgastados al masticar hierbas abrasivas acaban por caer. El alimento se digiere a medida que pasa por el largo tubo digestivo posterior (del ciego al ano), lo que lleva varios días.

Seguimiento por satélite

Los desplazamientos de los manatíes de Florida se siguen mediante telemetría vía satélite. Una plataforma flotante dotada de un transmisor se conecta a un manatí mediante un cinturón, que se desprende pasados algunos meses. El detalle muestra la hebilla del cinturón; el eslabón giratorio minimiza la resistencia al avance, mientras que la pieza de unión libera al manatí si la atadura se enreda en algún obstáculo.

La terminal emite señales codificadas, que informan de la identidad del manatí, la temperatura del agua y el ángulo al que la plataforma es remolcada, y se reciben por uno de los satélites de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA). El equipo del satélite calcula la posición del transmisor y retransmite toda la información a estaciones terrestres para su proceso y distribución.



en relación a su tamaño y tienen tasas metabólicas más elevadas.

En una curva de tasas metabólicas para mamíferos de pesos diferentes, del ratón al elefante, la mayoría de las especies marinas se sitúan donde debieran: en función de sus tamaños respectivos. Pero Blair Irvine, del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, C. James Gallivan y el malogrado Robin C. Best, del Instituto Nacional para la Investigación del Amazonas, en Brasil, encontraron que los manatíes se desvían mucho de esta pauta. Los manatíes del Amazonas metabolizan energía a sólo el 36 por ciento de la tasa esperable para mamíferos de su tamaño, mientras que los de Florida se sitúan entre un 15 y un 22 por ciento de los valores esperables.

¿Qué consecuencias tienen unas tasas metabólicas tan bajas? Una de las más sorprendentes es la capacidad que el manatí del Amazonas tiene para el ayuno prolongado. Como en los lejanos días de la evolución de los sirenios, las inundaciones estacionales del curso superior del Amazonas originan grandes prados flotantes de hierbas y otras plantas. Los manatíes nadan entonces por entre las copas de los árboles de los bosques inundados en lo que son épocas de abundancia, pero durante la estación seca pueden quedar aislados durante meses en lagos y estanques desprovistos de vegetación [véase "Bosques de inundación amazónicos", de Michael Goulding; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1993]. Como los mamíferos de zonas más frías que se preparan para el letargo invernal, los animales acumulan grandes cantidades de grasa durante la estación de las inundaciones, lo que les permite sobrevivir los flacos tiempos de la estación seca. Best calculó que los manatíes del Amazonas pueden permanecer sin comer casi siete meses, subsistiendo a base de la grasa almacenada y gastando energía a sus tasas metabólicas habitualmente bajas.

No sabemos si existe una relación similar entre metabolismo, engorde y ayuno estacional en otras especies de manatíes. Pero es bien conocida la influencia de las bajas tasas metabólicas en la distribución de los manatíes de Florida. Los animales no viven al norte de Florida o de Georgia durante todo el año. Incapaces de metabolizar energía con la rapidez suficiente para contrarrestar la pérdida de calor hacia las frías aguas circundantes, los manatíes no pueden expandirse probablemente más allá de los climas subtropicales. Casi todos los sirenios han vivido en regiones cálidas en los tiempos de que se tienen datos.

Sin embargo, casi todos los años se avistan manatíes al norte de su

zona de distribución típica. Estos vagabundos estivales retornan al sur en otoño o mueren y quedan varados en las riberas de Virginia o de las Carolinas al llegar el invierno. Los cadáveres se caracterizan por la ausencia de depósitos de grasa y por otras señales de exposición prolongada al frío. Se han registrado vagabundos tan al norte como en el curso bajo del río Potomac y estoy convencido de que los "monstruos marinos" avistados en la bahía de Chesapeake (y por ello llamados "Chessie") durante los últimos decenios eran manatíes de Florida errantes.

Los manatíes encuentran incómodas incluso las temperaturas invernales de Florida, por lo que emigran al tercio meridional de la península o a fuentes locales de agua más cálida. Entre éstas se hallan manantiales artesianos de la costa del Golfo, como Crystal River, y efluentes de papeleras y de plantas de energía eléctrica. En los días más fríos, en muchos de estos lugares se congregan unos 300 animales. Estas congregaciones invernales fueron durante muchos años la única ocasión que tenían los biólogos para observarlos en condiciones naturales.

A principios de los años cincuenta, Joseph C. Moore, del Parque Nacional de los Everglades, advirtió que puede distinguirse a los diferentes individuos por las cicatrices dejadas por las hélices de las embarcaciones, lo que le permitió hacer algunas observaciones de comportamiento básicas. A sus estudios les siguieron los de Daniel Hartman en los sesenta, por aquel entonces estudiante graduado de la Universidad de Cornell. Hartman siguió la pista de hembras concretas y de sus descendientes en Crystal River. En la actualidad, el Servicio Biológico Nacional mantiene un catálogo informatizado de modelos de cicatrices en el que se identifica a varios cientos de manatíes de Florida de toda su área de distribución.

La observación de la vida de algunas docenas de hembras en la naturaleza durante más de diez años (y algunas durante veinte y hasta veinticinco años) nos ha permitido conocer su ciclo reproductor. Las hembras alcanzan la madurez sexual muy jóvenes, a los tres años, y continúan reproduciéndose durante más de veinte años. Cada dos o tres años nace una cría; a veces hasta nacen gemelos.

Las interacciones sociales parecen girar alrededor de la reproducción. Los manatíes son básicamente animales solitarios, pero cuando una hembra está en estro se ve perseguida por un rebaño de seis a veinte machos que se empujan y forcejean. Alrededor de un año después de aparearse, al parecer con varios machos, la hembra selecciona una zona recogida para parir. Madre e hijo permanecen juntos durante al menos un año, y mantienen contacto mediante débiles vocalizaciones chirriantes.

Se ha visto a algunas hembras junto a sus crías hasta un año después del destete, y quizá continúen reconociéndose mutuamente durante mucho más tiempo. A veces, hay hembras lactantes que "adoptan" y amamantan a crías que no son las suyas. De vez en cuando los manatíes se asocian en grupos efímeros, a los que se añaden y de los que se marchan individuos aparentemente al azar.

En 1978 se establecieron límites de velocidad para las embarcaciones en los lugares de congregación invernal. Aun así, manatíes y barcas continuaron colisionando en otros momentos y lugares. Para proteger a los animales en sus distintos hábitat, los responsables tenían que saber más cosas sobre su distribución y sus pautas de migración, lo que posibilitaron luego los avances en radiotelemetría, ofreciendo un método de observar a los manatíes en sus viajes a largas distancias.

Los de Brasil y Florida fueron los primeros en ser seguidos por radio en los años setenta. Se sujetaba para ello un transmisor a un cinturón (diseñado para corroerse y desprenderse una vez finalizado el estudio) colocado alrededor de la constricción que existe entre el cuerpo de un manatí y su cola espatulada. Sin embargo, la técnica no era útil en aguas costeras, pues el agua salada impide el paso de las ondas de radio.

Por ello Galen B. Rathbun, James P. Reid y James A. Powell diseñaron un transmisor flotante conectado al cinturón mediante una traílla de nailón flexible de dos metros de longitud. La atadura estaba equipada con eslabones giratorios para minimizar la resistencia al avance y con eslabones de rotura para evitar que el manatí quedara atrapado si la traílla se atorara. El dispositivo mantenía la antena en el aire durante la mayor parte de las actividades del manatí en aguas someras. Desde aviones ligeros podíamos localizar manatíes hasta entre 35 y 50 kilómetros de distancia, y hasta entre 8 y 17 kilómetros desde embarcaciones o desde la costa.

Pronto pudimos avanzar un paso más en la idea del transmisor-flotador. Bruce Mate, de la Universidad Estatal de Oregón, había estado intentando



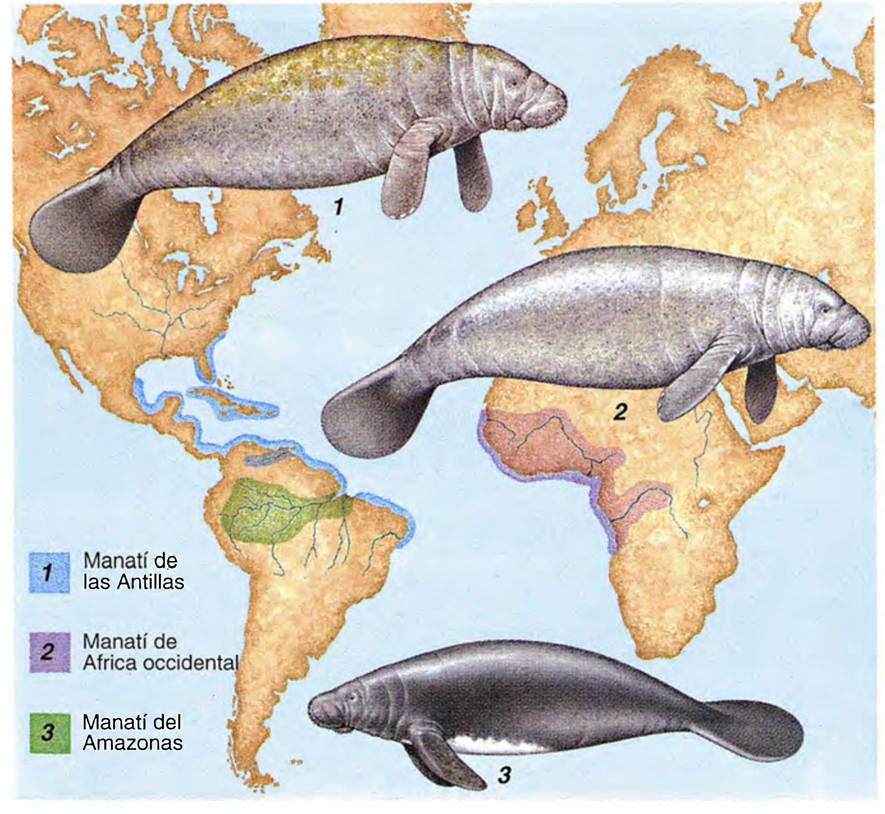
4. UN JACINTO DE AGUA, una planta flotante, es mantenido en posición adecuada con una aleta mientras el manatí de Florida lo despoja de sus anchas hojas en la Reserva Natural Nacional de Crystal River.

seguir la pista de las grandes ballenas en el océano abierto. Resolvió sus tremendos problemas logísticos fijándoles unos "terminales transmisores de plataforma" cuya emisión era captada por satélites. Estos transmisores, utilizados para realizar el seguimiento de globos meteorológicos y de embarcaciones en el mar, emiten señales de frecuencia muy elevada. Los satélites las reciben y retransmiten la información codificada a centros terrestres de procesamiento, desde los cuales viaja por enlaces telefónicos a ordenadores personales. A las pocas horas del último paso de un satélite sobre un transmisor, un investigador puede conocer la situación de una ballena.

En 1985, Rathbun, Mate y Reid soltaron un manatí con un transmisor de este tipo en aguas de la costa del Golfo, en Florida. Sus señales fueron recibidas por satélites de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. Desde entonces, hemos seguido los desplazamientos de más de 100 manatíes con transmisores de uno u otro tipo, la mayoría de ellos vía satélite. La técnica ha sido adoptada por el Departamento de Protección Ambiental de Florida, se está utilizando en Puerto Rico y se ha aplicado a dugones en Australia.

El enlace vía satélite revela la localización de un manatí (con un margen de 100 metros), la temperatura del agua y el número de veces que el transmisor es golpeado, lo que da información sobre la actividad del animal. En Florida, esta información se correlaciona con mapas de las praderas de fanerógamas marinas, de las aguas cálidas y de otros recursos para los manatíes existentes en el Instituto de Investigaciones Marinas del Departamento de Protección Ambiental de Florida, en Saint Petersburg. Anteriormente se creía que los manatíes de Florida se desplazaban con lentitud y eran esencialmente nómadas. Ahora sabemos que pueden viajar relativamente deprisa (hasta 50 kilómetros diarios) y que sus movimientos estacionales pueden tener destinos bastante definidos. Algunas hembras, por ejemplo, suelen pastar en aproximadamente las mismas zonas todos los veranos y se dirigen a los mismos puntos cálidos todos los inviernos. Los hijos parecen aprender las pautas migratorias de la madre.

Con todo, y por lo general, los manatíes son flexibles en los tipos de hábitat que ocupan. Hemos seguido los desplazamientos de individuos desde el sur de Georgia y el nordeste de Florida (donde el alimento principal son hierbas de marismas saladas, accesibles sólo sobre las orillas en la marea alta) que viajaron en menos de cinco días a la Reserva Natural Nacional de Merritt Island, donde se alimentan casi exclusivamente de angiospermas marinas sumergidas y enraizadas. Tras pasar un tiempo en esta región, rica en la fauna silvestre clásica de Florida, tal como aves limícolas, tortugas marinas, delfines mulares y caimanes (que a veces agarran y desprenden los transmisores remolcados), los mismos manatíes pueden continuar hacia el sur, llegando a las afueras de Fort Lauderdale y Miami para pasar allí las semanas más frías del año.

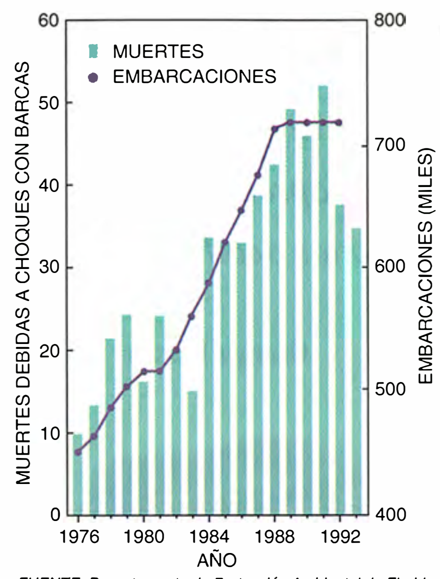


5. TRES ESPECIES DE MANATIES viven actualmente en aguas tropicales y subtropicales. El de las Antillas, que aquí se ilustra con algas sobre el dorso, es el que más se parece al triquéquido primitivo. El africano desciende de manatíes antillanos que se dispersaron y la especie amazónica tiene la dentición más compleja.

El hecho de saber más sobre la adaptabilidad de los manatíes a los diversos entornos y sobre su tasa de reproducción nos ha hecho algo más optimistas en cuanto a su supervivencia en Florida, una vez se los haya protegido adecuadamente. Los esfuerzos administrativos realizados por el estado de Florida, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos y los gobiernos locales para reducir los accidentes tienen grandes posibilidades de tener éxito. Hemos combinado los relatos de avistamientos repetidos de manatíes existentes en el catálogo de modelos de cicatrices con teorías estadísticas recientes para obtener estimaciones de la tasa de supervivencia interanual de los manatíes adultos. Las posibilidades de supervivencia son buenas en regiones con un historial de protección sólido, como Crystal River. Allí la población ha aumentado desde unos 60 animales hace unos veinte años a cerca de 300 en la actualidad. En el conjunto de Florida, se han contado 1856 manatíes desde el aire en invierno.

No sabemos cuántos manatíes escaparon a estos recuentos. Aunque la pauta general, durante los decenios de 1970 y 1980, indicaba que estaban aumentando los manatíes de varias regiones de Florida, las tendencias de los últimos años plantean la duda de si la población está creciendo realmente. Junto a unas estimas menores de supervivencia en las regiones menos protegidas (según nuestros modelos matemáticos) y a que se encuentran más manatíes muertos debido a actividades humanas, las incertidumbres en los datos poblacionales recientes reclaman esfuerzos continuados de conservación centrados en algunas zonas clave de Florida. Si tales esfuerzos mantienen su ímpetu (y si se descuentan catástrofes imprevistas), el manatí de Florida podría convertirse en una de las pocas historias con final feliz de entre las especies amenazadas.





6. MANATI MUERTO POR UNA BARCA, mostrando los tajos infligidos por una hélice. El gráfico detalla el aumento del número de embarcaciones registradas en Florida y el del número de manatíes muertos por embarcaciones desde mediados de los años setenta. La correlación es muy sugestiva, aunque no demuestre una relación de causa a efecto. El aumento del número de embarcaciones indica que su uso recreacional va en aumento y lo mismo ocurre con su efecto destructor sobre el entorno del manatí.

En última instancia, lo que va a salvar a estos animales es la disposición favorable del público. A este respecto, ha habido un cierto progreso real. Los manatíes se han hecho extremadamente populares. Por ejemplo, al visitar la clase del parvulario de mi hija me encontré agradablemente sorprendido al ver (en el alfabeto permanente situado sobre la pizarra), junto a la "A" de árbol, la "M" de manatí.

A nivel internacional, la situación es menos reconfortante. Aunque la mayor parte del medio centenar de naciones en las que viven manatíes les ofrecen protección legal, las leyes no se hacen cumplir adecuadamente. Tampoco se han hecho muchos intentos de proteger su hábitat (si se exceptúa Florida). Guatemala creó la primera reserva mundial de manatíes hace unos treinta años. Pocas veces se ve por allí a los tímidos animales, pero la reserva se mantiene todavía. A lo largo de la costa de Panamá, donde hace siglos Dampier aprovisionó a sus cuadrillas, un reducido número de manatíes persiste en los ríos de la región de Bocas del Toro, y grupos de conservación panameños están trabajando en su favor.

Será una batalla laboriosa. Pero intentos similares están iniciándose en otras partes. Una nueva generación de biólogos conservacionistas del Atlántico tropical es cada vez más entusiasta y está más preocupada por los manatíes, como quedó patente en la Primera Conferencia Internacional sobre Manatíes y Dugones celebrada en la Universidad de Florida la pasada primavera. Los esfuerzos para aprender más acerca de los manatíes en los trópicos y para aplicar esta información a la conservación parecen ir en aumento, lo que hace crecer la esperanza en el futuro.

Los indios warauno, del delta del Orinoco, en Venezuela, denominan "camino del manatí" a la Vía Láctea. Me siento confiado en que los caminos subacuáticos del manatí continúen siendo frecuentados por nuestros ríos y por las costas del Atlántico tropical aquí en la Tierra, para maravilla y deleite de las generaciones futuras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DISTRIBUTION, STATUS AND BIOGEOGRAPHY OF THE WEST INDIAN MANATEE. L. W. Lefebvre, T. J. O'Shea, G. B. Rathbun y R. C. Best en *The Biogeography of the West Indies: Past, Present and Future.* Dirigido por C. A. Woods. Sandhill Crane Press, 1989.

MANATEES AND DUGONGS. J. E. Reynolds III y D. K. Odell. Facts on File, 1991.

WATERBORNE RECREATION AND THE FLORIDA MANATEE. T. J. O'Shea en *Wildlife and Recreationists: Coexistence through Management and Research.* Dirigido por Richard L. Knight y Kevin J. Gutzwiller. Island Press, Covelo, California (en prensa).

Jean Henri Fabre

Este entomólogo solitario se convirtió en uno de los educadores más conocidos de su tiempo. Hoy podemos apreciar la minusvaloración de sus logros científicos junto a las debilidades de su metodología

Georges Pasteur





Boletus appendiculatus



Orden Aphyllophorales



Lactarius sanguifluus

Ya casi nadie recuerda al entomólogo y autor Jean Henri Fabre. Sin embargo, durante el siglo XIX y principios del XX, fue uno de los más apreciados divulgadores de historia natural. Victor Hugo le llamó el "Homero de los insectos" y Edmond Rostand le rebautizó como el "Virgilio de los insectos". Hacia el final de su vida, Fabre fue propuesto para el Premio Nobel de Literatura; pero el entusiasmo excesivo de quienes le apoyaban, que presionaron en demasía a la Academia sueca, seguramente neutralizó cualquier posibilidad que hubiera podido tener.

Hoy en día, donde más se conoce a Fabre es en Japón. Muchas exposiciones tratan sobre él y sus obras se utilizan normalmente en las escuelas. Desde 1923 las editoriales japonesas han publicado no menos de 47 traducciones completas o parciales de su obra en diez volúmenes titulada *Souvenirs entomologiques* (*Recuerdos entomológicos*), así como diversas ediciones de sus otros trabajos.

GEORGES PASTEUR se dedicó a estudiar a Fabre por sugerencia del entomólogo americano G. P. Georghiou. Investigador de los vertebrados africanos, Pasteur inició sus estudios sobre el comportamiento de los insectos al analizar las consecuencias de la selección para geotropismo y fototropismo en la mosca del vinagre en el laboratorio de Theodosius Dobzhansky en la Universidad Rockefeller en 1968 y 1969. Ha dirigido el laboratorio de genética y ecología de la Escuela Práctica de Estudios Superiores de Montpellier desde 1978 y colabora con el Museo Nacional de Historia Natural. Es también vicepresidente de la Sociedad Francesa de Sistemática. Además de haber publicado varios libros en francés, es coautor con su mujer de *Practical Isozyme Genetics*.

Generaciones de investigadores de todo el mundo han rendido también culto a la memoria de Fabre. Recuerdan con agrado cómo la lectura de fragmentos de los *Souvenirs* consolidó sus vocaciones adolescentes. El efecto inspirador de Fabre no deja de ser irónico: algunos de sus principios científicos ya eran heterodoxos en su tiempo y lo siguen siendo hoy. Además, aunque Charles Darwin sintió gran admiración por Fabre y se refirió a él como "observador inimitable" en *Sobre el origen de las especies*, Fabre se negó a aceptar la teoría de la evolución.

Pero el encanto de *Souvenirs entomologiques* supera cualquier rareza intelectual que su autor haya podido tener. Como él mismo le explicaba a J. B. Dumas, antiguo mentor de Louis Pasteur, en una carta de 1882, en *Souvenirs* había adoptado un "estilo ligero" para "llegar a los lectores corrientes además de a los naturalistas". Y eso fue lo que ocurrió: *Souvenirs* fue un éxito de ventas desde la aparición del primer volumen en 1879.

Las más de cuatro mil páginas de *Souvenirs* combinan la originalidad científica con una prosa extraordinariamente rica y vital, a veces cómica, a veces poética, y siempre ingeniosa. Alternan los recuerdos y las digresiones sobre todo tipo de temas, con historias enigmáticas sobre la investigación del comportamiento de los insectos. Se exponen las vivencias y opiniones de Fabre sobre innumerables cuestiones. Y se aúnan un optimismo que nunca decae y una admiración inagotable por la naturaleza en un ambiente distendido, como es el que impera en los campos llenos de insectos que revolotean alegremente en los días cálidos del verano. De este modo, *Souvenirs* nos ofrece un atisbo único sobre el carácter científico y humano de su autor.

Nacido en 1823 en el seno de una familia rural modesta del sur de Francia, Fabre tuvo que esforzarse mucho durante sus primeros años para conseguir becas, y realizar luego los trabajos manuales necesarios para costearse sus estudios. Como apenas pudo ir a la escuela durante algunos años, se hizo autodidacto hasta un extremo inimaginable. Por sí solo aprendió griego clásico e inglés. Terminó la carrera de letras en 1844 y la de ciencias exactas en 1846; luego obtuvo la licenciatura en matemáticas en 1847 y la de ciencias físicas en 1848. Posteriormente obtendría la licenciatura en las otras ciencias naturales. Sus resultados académicos

fueron muy notables si se tiene en cuenta que rara vez iba a clase. En 1855 consiguió el título de *docteur ès sciences* por la Sorbona, trabajando duro en su cocina para completar las tres tesis requeridas, una sobre animales y dos sobre plantas.

Estos principios cimentaron la vida de reclusión que Fabre iba a tener posteriormente. Mientras trabajaba como profesor de física en un liceo, se convirtió en el clásico ermitaño. Sus costumbres solitarias iban a contracorriente, siendo ésta una de las razones que le impidieron llegar a ser profesor universitario. Pero un motivo más poderoso fue su falta de medios económicos. La Universidad de Poitiers le ofreció una plaza hacia 1860, pero Fabre no pudo aceptarla a causa de su falta de independencia económica; en esa época, a los profesores universitarios se les pagaban sólo sueldos simbólicos y las becas de investigación no existían.

Fabre combatió la pobreza de dos maneras. Primero, poniendo en práctica sus conocimientos de química, trató de resolver el problema de la extracción del colorante rojo alizarina, que se utilizaba mucho en la industria textil, de la hierba rubia, una planta autóctona de Europa. Fabre tuvo éxito donde otros habían fracasado, y en 1866 consiguió una patente por su método de obtención de polvo de alizarina pura a partir de la hierba rubia. Desgraciadamente, su suerte duró poco. Hacia 1867 los químicos alemanes consiguieron sintetizar alizarina a partir de otros compuestos, con el resultado de que se abandonó el cultivo de la hierba rubia.

La segunda manera de hacer dinero tuvo resultados más permanentes. Fabre se convirtió en el Isaac Asimov del siglo XIX: escribió libros que pusieron la ciencia y la tecnología al alcance de los niños y de los adultos, sustituyendo el discurso racional por el narrativo popular, típico de la manera de pensar de la mayor parte de la gente. Entre 1862 y 1891 escribió 95 de tales libros, todos los cuales fueron éxitos de ventas. De hecho, en vida de Fabre, varios de ellos se vendieron mucho mejor que *Souvenirs*. Otros continuaron reimprimiéndose hasta entrada la década de 1920; *Le Ciel* (*El cielo*), aparecido en 1865, conoció 11 reimpresiones. Todavía en 1986 se publicó una edición japonesa, profusamente ilustrada, de *Histoire de la bûche* (*Historia del leño*), puede que la más conocida de sus obras.

En 1868, y a causa de la fama que le daban esos libros, el ministro de Educación le pidió personalmente a Fabre —entonces profesor sustituto en un instituto de provincias— que fuera tutor del hijo de Napoleón III. Fiel a su carácter solitario, rehusó ese honor. (Es más, en *Souvenirs* narra lo ansioso que estaba por dejar la corte mientras se encontraba allí.) Fue una decisión inteligente, en vista del destino que poco después le aguardaba al emperador y a su corte.

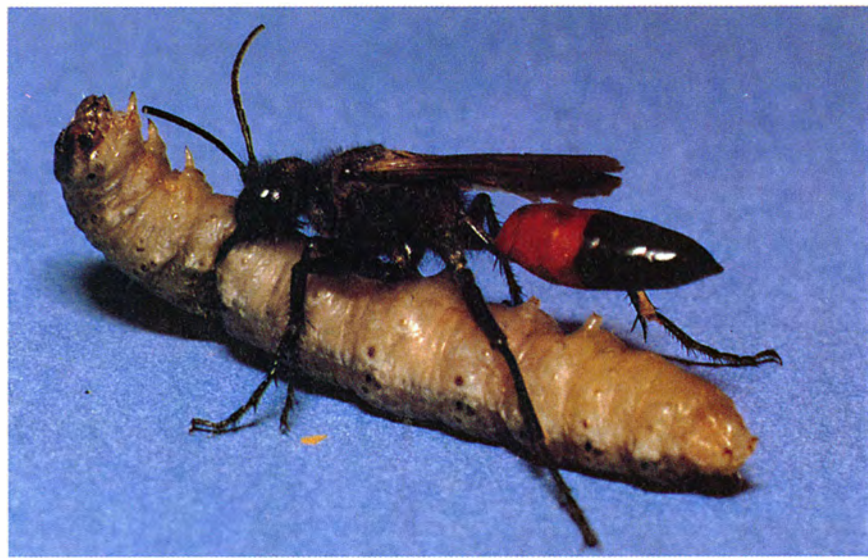
Entre ese episodio y la guerra franco-prusiana de 1870, la firme convicción de Fabre de que había que mejorar la situación de la mujer le causó problemas. Había comenzado a dar un ciclo de charlas vespertinas para jovencitas con gran éxito. La educación femenina, sin embargo, siempre había sido asunto de la Iglesia Católica, que no consideró del todo satisfactorio su programa. Pronto se le amonestó a nivel nacional por crímenes tales como enseñar a las chicas la función sexual de las flores. La guerra acabó de una vez con el ciclo de charlas y con el escándalo, pero en 1871 Fabre y su familia tuvieron que dejar la casa donde vivían a petición de sus dueñas, dos devotas solteronas católicas.

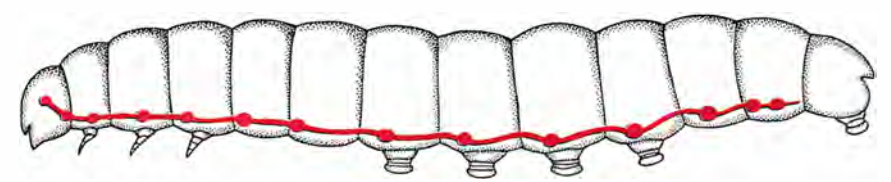
Esa expulsión fue decisiva en su vida, que hasta ese momento no había sido grata, pues le pesaba tremendamente no haber hecho realidad los sueños de su juventud, cual era haber sido profesor de universidad.



1. "OBSERVADOR INIMITABLE", como Charles Darwin le llamaba, Jean Henri Fabre, llevó a cabo estudios entomológicos muy minuciosos en la campiña de su casa en el sur de Francia. Sus libros sobre insectos y sobre muchos otros temas han hecho apreciar la ciencia a generaciones enteras de lectores. Fabre cuenta, entre otros logros suyos, el haber sido también un excelente pintor de setas (*página opuesta*).







2. LAS AVISPAS PARASITAS, como *Podalonia*, inmovilizan a los insectos aguijoneándolos (*arriba*), luego los arrastran (*en medio*) y depositan los huevos sobre sus cuerpos. Como Fabre observara, las avispas "conocen" instintivamente la anatomía de sus presas (*abajo*): aguijonean a la oruga cerca de los centros nerviosos de cada segmento (*en rojo*) para paralizarla sin matarla.

La desgracia súbita de verse en la calle le permitió cambiar esa situación.

Gracias a un préstamo de su rico amigo John Stuart Mill, Fabre, que contaba entonces 48 años, decidió jubilarse. Acto seguido se dedicó enteramente a escribir, a observar la naturaleza y a experimentar con insectos. En 1879, el año en que apareciera el primer volumen de *Souvenirs*, la familia Fabre se trasladó a L'Harmas, una parcela baldía de unos 2 acres, a unos 10 km al oeste de Orange, que Fabre seleccionó como "un laboratorio vivo de entomología". (Hoy en L'Harmas se puede visitar el anexo Fabre del Museo Nacional de Historia Natural francés.)

Durante más de cuarenta años, hasta su muerte en 1915, Fabre prosiguió con su trabajo. Además de sus *Souvenirs*, escribió poemas en dos idiomas y compuso melodías basadas en algunos de ellos. También pintó 700 láminas de setas, elegantes y bellamente coloreadas, que seguramente se cuenten entre las más hermosas jamás realizadas.

Desde una visión retrospectiva, podemos pensar que si Fabre hubiera realizado su sueño de llegar a ser catedrático de universidad, no se habría jubilado antes de 1893, y posiblemente habría sido ya demasiado tarde para emprender un programa de investigación como el que iniciara en L'Harmas. En el mejor de los casos, habría dejado tras de sí un equivalente muy reducido de los *Souvenirs*, en detrimento de la herencia cultural de la humanidad.

Los estudios sobre insectos que Fabre refleja en sus *Souvenirs entomologiques* representan su interés intelectual principal, y por esta razón merecen la máxima atención. Aquí ofrezco un resumen de su contenido científico desde mi perspectiva de biólogo de finales del siglo XX.

El aspecto más notable del trabajo de Fabre fue su énfasis en la experimentación. Hasta él, los pocos experimentos que se habían realizado sobre el comportamiento animal se limitaban esencialmente a aves. Esta anomalía no es tan extraña como pueda parecer. Las fases protocolarias de la experimentación biológica, que dependen de estudios controlados y análisis de probabilidad, no son algo obvio. La verdadera experimentación no aparecerá en la historia de la ciencia hasta Galileo. Pocos biólogos han poseído a la vez la capacidad de seleccionar los organismos de estudio adecuados y el don para concebir pruebas que dieran resultados de significado indubitable.

Para ser justos, se debe decir que Fabre no fue el único en acudir a la experimentación para estudiar el comportamiento animal. El científico británico John Lubbock (1834-1913) fue el primero que utilizó laberintos y situaciones problemáticas en el estudio del comportamiento de los insectos, métodos de investigación que se han convertido en el fundamento de los trabajos de laboratorio posteriores sobre toda clase de animales. Pero el impacto de Lubbock fue sobre la investigación de laboratorio (sobre todo en América), mientras que Fabre tuvo más influencia en los estudios de campo (especialmente en la Europa continental).

Los entomólogos recuerdan algo a Fabre por su estudio detallado de la metamorfosis de los insectos. Todos los insectos comienzan su vida como larvas, que salen de los huevos, y la concluyen como adultos, pero entre tanto pasan por distintos tipos de estadios intermedios. Algunos insectos, como el lepisma, alcanzan su forma adulta muy temprano, aumentando su tamaño mediante mudas. Los saltamontes y los insectos verdaderos maduran mediante un proceso de meta-

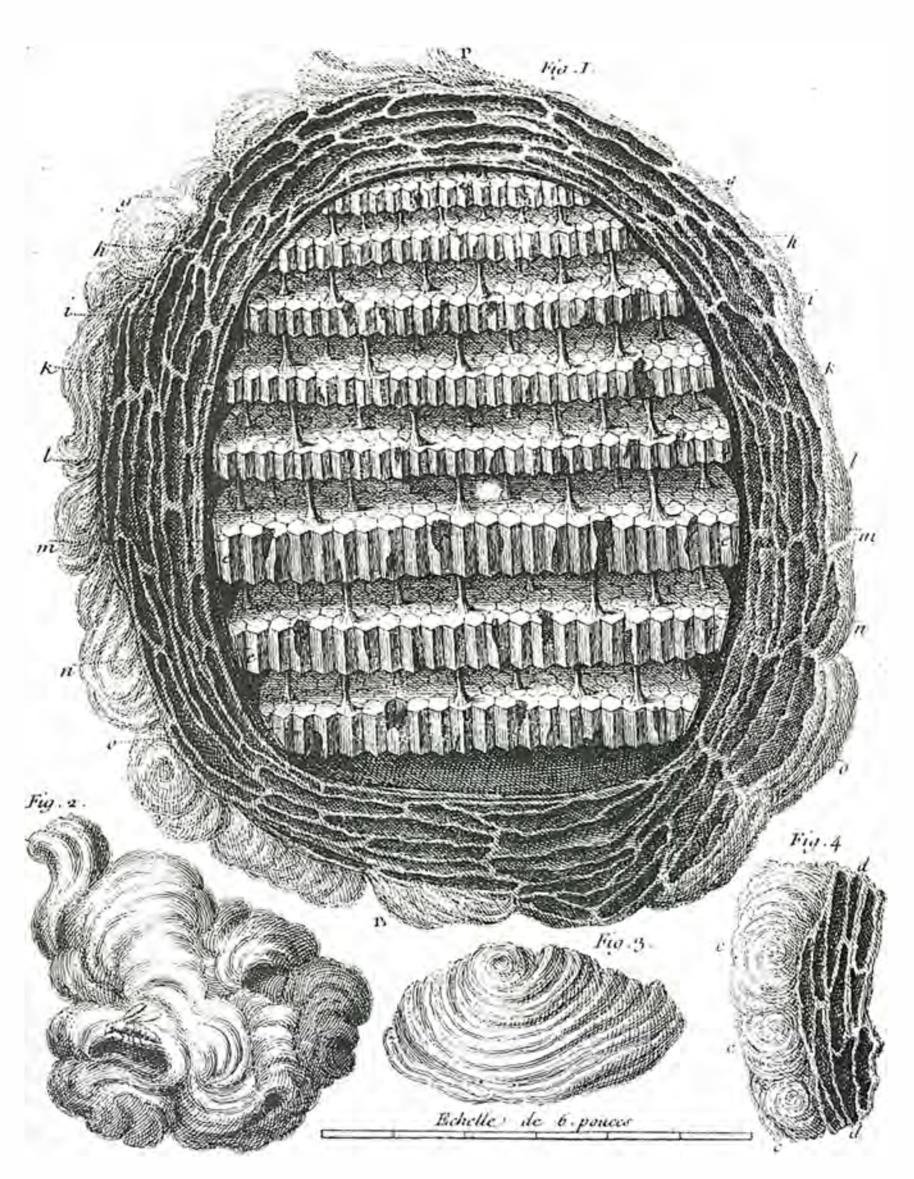
morfosis incompleta, gracias al cual las larvas se convierten en ninfas, que se parecen mucho a los adultos pero carecen de alas; solamente al alcanzar la plena madurez las ninfas se convierten en insectos alados. Los escarabajos, las moscas y otros insectos experimentan una metamorfosis completa, durante la cual las larvas se transforman en pupas inmóviles y posteriomente en adultos completos alados. Fabre examinó todos esos ciclos biológicos en detalle y descubrió un cuarto tipo. Las cantáridas pasan por dos o más estadios larvales y de pupación intermedios antes de completar su metamorfosis al estado adulto. Fabre denominó esa pauta de transformación hipermetamorfosis, el único término científico que acuñara en su vida.

A pesar de estas contribuciones, en general Fabre no ha recibido de los medios científicos el reconocimiento que merece. Parte del problema se debe a que *Souvenirs* es una obra literaria sin diagramas y con pocas tablas, por lo que tuvo poca oportunidad de suscitar el interés de los expertos. Los investigadores que lo leyeron se sintieron impresionados por las mismas razones que los lectores profanos y no siempre por lo que era científicamente importante.

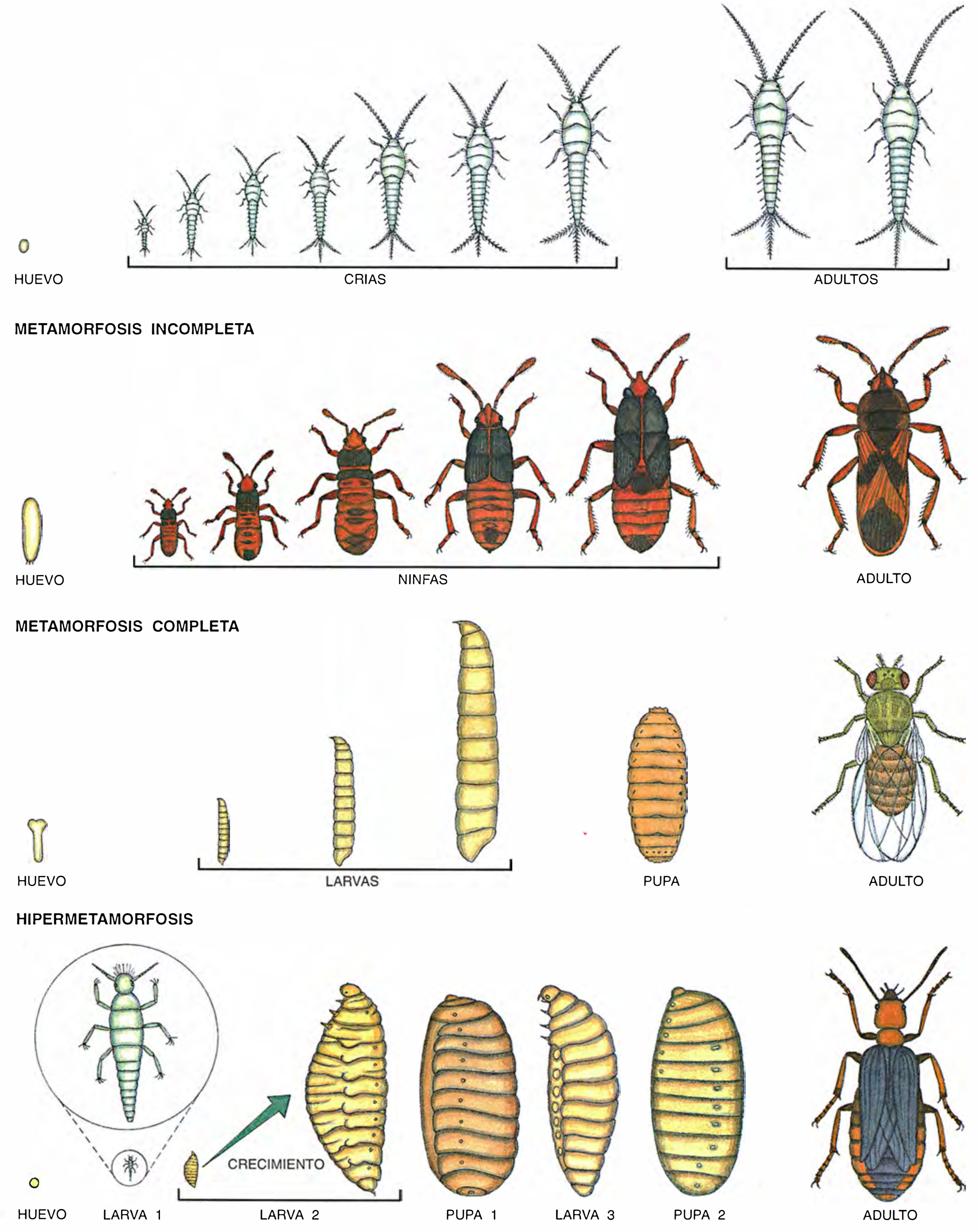
Los científicos han pasado por alto que Fabre fue el primero en demostrar el tropismo en animales. Este fenómeno es un reflejo por el cual un organismo se dirige hacia un cierto estímulo o en dirección opuesta al mismo. Este concepto se le atribuye generalmente al investigador germano-americano Jacques Loeb, quien lo desarrolló en el decenio de 1890 como la contrapartida animal de los tropismos en plantas, la tendencia de las plantas a crecer hacia la luz o contra la gravedad. Sin embargo, Fabre identificaba ciertos tropismos en insectos ya hacia 1875, cuando iniciara una andadura investigadora con abejas silvestres que duró seis años. Demostró, por ejemplo, que las abejas que salen de las pupas poseen una tendencia innata a dirigirse hacia arriba (contra la gravedad) y hacia el aire fresco, con variaciones dependientes de la especie. Por ejemplo, introdujo diez pupas de abeja *Osmia* en tubos verticales cerrados por arriba y abiertos por abajo. Solamente las tres abejas próximas a la abertura escaparon; las otras se movieron obsesivamente hacia arriba y quedaron atrapadas hasta la muerte.

También conozco un caso en que Fabre descubrió la clave de un fenómeno que todavía hoy muchos biólogos malinterpretan. Se trata del mimetismo que muestran las moscas *Volucella*, que se parecen mucho a las abejas y a las avispas y ponen sus huevos en los nidos de esos insectos. La hipótesis más antigua sobre el mimetismo publicada data de 1817 y declara que la similitud entre las moscas *Volucella* y los abejorros significaba que las moscas eran parásitos de la nidada del otro insecto. Esto es, las moscas que parecen abejas podían entrar en los nidos de las abejas y depositar sus huevos sin miedo a ser atacadas. Las larvas de la mosca se alimentarían posteriormente del contenido del nido.

Un aspecto crucial de esta hipótesis es que la presencia de las moscas en el nido daña a las abejas. Pero, aparte de esto, las abejas anfitrionas no ven razón para atacar a sus hués-



3. MOSCAS *VOLUCELLA* (*arriba*) mimetizan las avispas y depositan sus huevos dentro de los nidos de avispa (*derecha*). Muchos entomólogos han descrito equivocadamente a las moscas como parásitos de las avispas. Fabre fue el primero en darse cuenta de que moscas y avispas se benefician mutuamente. El dibujo del nido de avispa es de René A. F. de Réaumur, a quien Fabre admiraba.



4. LOS INSECTOS LLEGAN AL ESTADO ADULTO siguiendo una serie de pautas de desarrollo, que Fabre observó en su totalidad en el transcurso de su trabajo. Los lepismas tienen esencialmente la misma forma que las larvas; crecen hasta el estado adulto mediante mudas. Los insectos verdaderos adoptan el estado de ninfa, forma distinta a la adulta, antes de transformarse en adultos alados. Las moscas experimentan una metamorfosis completa, durante la cual los gusanos (larvas) se convierten en pupas y emergen como adultos. Fabre descubrió un cuarto ciclo: la hipermetamorfosis que se da en los escarabajos meloidos, que pasan por distintos estados larvales y de pupa antes de transformarse en adultos.

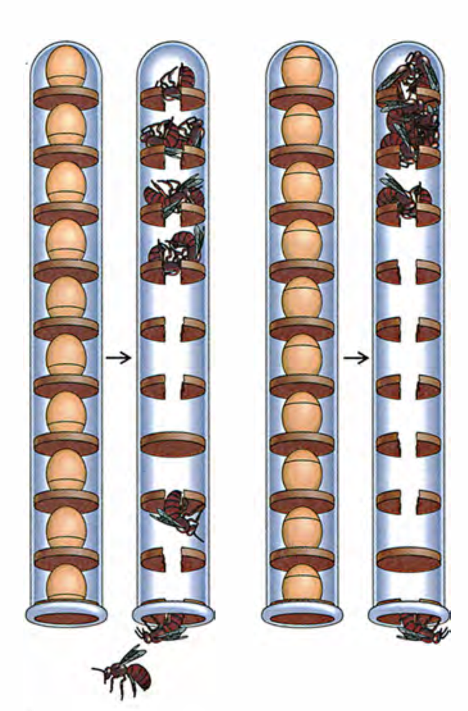
pedes. Si abejas y moscas no son antagonistas, la mejor explicación para el mimetismo de las moscas es que constituye una protección contra las aves. (Moscas y escarabajos a menudo adoptan los colores de aviso de las avispas para repeler a las aves, muchas de las cuales evitan a los insectos con aguijones.)

Hacia 1860, cuando muchos científicos citaban el mimetismo como prueba a favor de las ideas de Darwin sobre la evolución, esa hipótesis se generalizó con entusiasmo a otros casos de mimetismo en insectos. Entre éstos estaba *Volucella zonaria*, cuyas larvas se desarrollan en los nidos de las avispas europeas comunes. Pero pocos investigadores de los siglos XIX y XX se molestaron en averiguar si la historia natural de *V. zonaria* apoya la idea del parasitismo de la nidada como explicación del mimetismo.

Fabre fue más cuidadoso. En *Souvenirs* describe cómo el nido de la avispa común, una estructura subterránea muy oscura, se limpia meticulosamente por avispas obreras, que arrojan cualquier desperdicio, insectos moribundos y cadáveres, a un pozo adyacente que hace las veces de fosa común. Las moscas corrientes, que no se parecen a las abejas, vuelan constantemente dentro y fuera del nido sin ser atacadas, a no ser que aterricen donde se desarrollan las larvas de avispa. Cualquier mosca que sea lo suficientemente imprudente para aventurarse en ese lugar —incluso aquellas con mejores recursos miméticos que *V. zonaria*— encuentran una muerte segura. Estas y otras observaciones sugieren que el mimetismo visual no beneficia a las moscas de *Volucella* dentro del oscuro nido o a su entrada.

Como Fabre también observara, las moscas *Volucella* depositan sus huevos sin problemas en las zonas exteriores del nido, lejos de su centro. La mayor parte de las larvas de mosca caen en la fosa común y allí se ceban en los cuerpos de las avispas muertas. Las larvas de mosca que entran en el nido no suscitan la atención de las avispas obreras y pueden llegar al panal. Fabre descubrió que las larvas de mosca no compiten por el mismo alimento que las de avispa. Es más, las larvas de mosca se arrastran y entran en las celdillas donde se alojan las larvas de avispa, las pasan de largo y consumen los jugos que se acumulan en el fondo. Las larvas de mosca y de avispa cohabitan y nunca se dañan entre sí, a no ser que la larva de avispa resulte herida, en cuyo caso la larva de mosca empieza a alimentarse sobre la herida. En líneas generales, las larvas de mosca pueden sobrevivir sobre cualquier materia animal, viva o en descomposición.

Fabre llegó a la conclusión de que la relación entre las moscas y las avispas no es parasitaria sino simbiótica: las larvas de *V. zonaria* buscan alimento en el nido de las avispas y como contrapartida contribuyen a su limpieza. Sin embargo, más de un siglo después, los libros de texto continúan diciendo que las moscas *Volucella* son probablemente parásitos de la nidada y que el mimetismo en estado adulto protege a las moscas de los ataques de las avispas, como si ambas cuestiones no hubiesen recibido otro tipo de explicación. La demostración de Fabre no excluye la posibilidad de que otras especies de mosca sean parásitas de avispa ni de que las larvas de *Volucella* se cubran de señales químicas o táctiles que las identifiquen miméticamente como larvas de avispa. De todos modos, los investigadores modernos deberían estar más familiarizados con los experimentos que Fabre realizó por ellos.



5. LA ORIENTACION INSTINTIVA, o tropismo, fue estudiada inicialmente por Fabre. Descubrió que las abejas *Osmia* que salen de las pupas se mueven instintivamente hacia arriba, en primer término, y luego hacia el aire fresco. Si se introducen las pupas en tubos cerrados por arriba, la mayor parte de la abejas muere en la parte superior del tubo. Solamente algunas en el otro extremo escapan atraídas por el aire fresco (*a*). Rotar la orientación de las pupas no influye sobre este fenómeno (*b*).

Si se le hubiera preguntado cuál era su trabajo más importante, Fabre habría señalado que su estudio sobre la diferencia entre las inteligencias animal y humana. En su tiempo, un amplio repertorio de anécdotas indicaba que los animales podían razonar. Fabre demostró, sin embargo, que aunque los insectos despliegan lo que pueden parecer capacidades mentales muy desarrolladas en sus ambientes naturales, manifiestan una torpeza absoluta cuando se enfrentan con situaciones fuera de lo normal. Poco importaba lo inútiles o contraproducentes que resultaran las respuestas normales de los insectos en el medio experimental diseñado por Fabre; éstos seguían respondiendo una y otra vez de la misma manera absurda. Estas demostraciones, y experimentos parecidos realizados con animales de compañía y aves, le convencieron de que la esencia de la mente de los humanos era fundamentalmente diferente de la de los animales.

Esa diferencia no mermó su fascinación por el comportamiento animal. De hecho, nada le entusiasmaba más que las manifestaciones del instinto de las avispas solitarias, que cautivaron su imaginación durante 50 años. Demostró que muchas avispas solitarias paralizan a su presa en vez de matarla y que depositan sus huevos sobre el animal inmovilizado, actividades en las que las avispas parecían demostrar un conocimiento asombrosamente preciso del sistema nervioso de su presa.

Fabre comprendió por qué las avispas parásitas actuaban de esa manera. La parálisis conserva fresco el alimento para la larva con la seguridad que supone la inmovilidad de la presa. La avispa deposita su huevo sobre una parte superficial blanda de la presa paralizada a fin de que la larva pueda empezar a comer sin problemas pero lejos de los ganglios cerebrales, que son esenciales para la supervivencia de la presa. Una maravilla de instinto, la larva va comiendo el cuerpo de la víctima hasta que llega al cerebro en el momento que ya ha concluido su desarrollo.

La paralización por medio del aguijón y la deposición de huevos se ha observado en cientos de especies de avispas, sobre todo por André L. Steiner de la Universidad de Alberta [véase "Identificación de sus patrones por las avispas parásitas", por James H. Tumlinson, W. Joe Lewis y Louise E. M. Vet; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1993]. La asombrosa diversidad de los comportamientos registrados impide hallar una

Reflexiones de un solitario

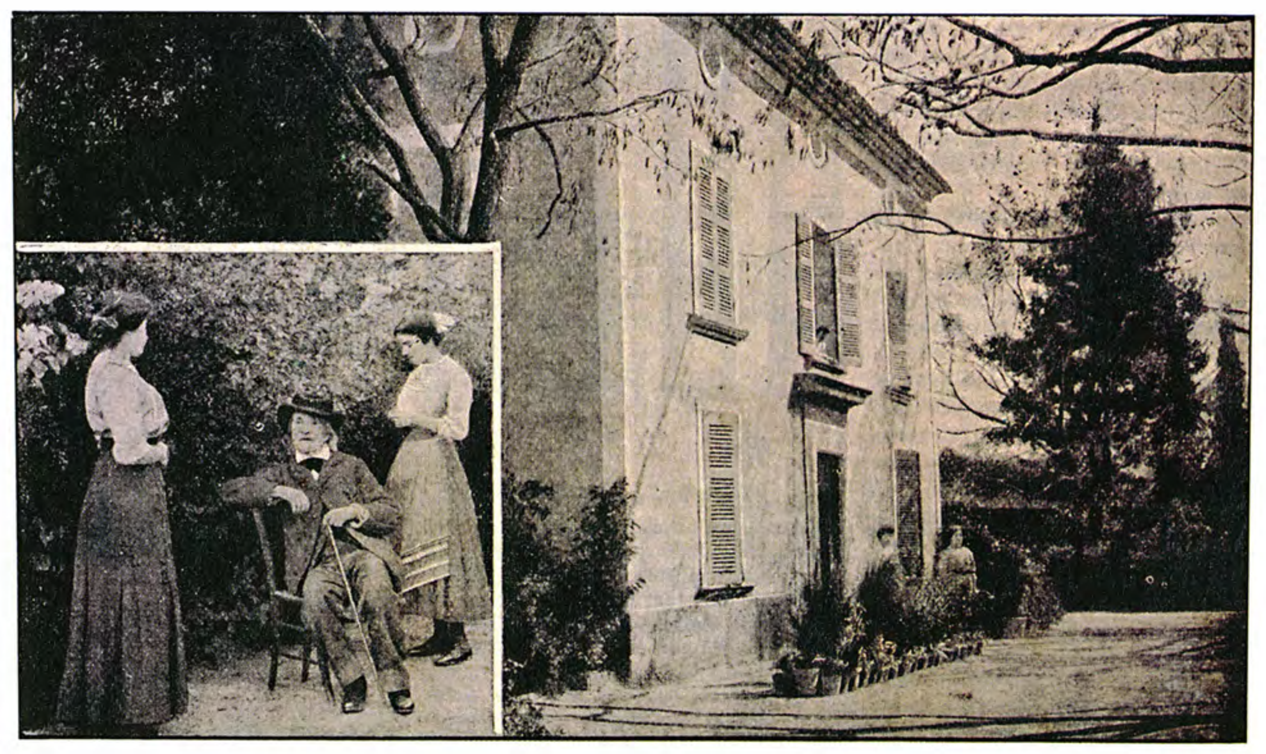
I. El harmas

"Era lo que yo deseaba, *hoc erat in votis*: un rincón de tierra, ¡oh!, no muy grande, pero cerrado y libre de los inconvenientes de la vía pública; un rinconcito abandonado, estéril, abrasado por el sol, favorable a los cardos y a los himenópteros. Allí, sin temor de ser molestado por los transeuntes, podría interrogar a la *Ammophila* y al *Sphex*, entregarme a ese difícil coloquio en el que la pregunta y la respuesta tienen por lenguaje la experimentación; allí, sin expediciones lejanas que devoran el tiempo, sin caminatas penosas que enervan la atención, podría combinar mis planes de ataque, disponer mis trampas y celadas y observar sus efectos cada día, en todo momento. *Hoc erat in votis*; sí, tal era mi deseo, mi sueño siempre acariciado, siempre fugitivo en la nebulosidad de lo por venir.

¡Qué comodidad poder disponer de un laboratorio en pleno campo, cuando uno se encuentra en las apreturas de la terrible inquietud del pan de cada día! Cuarenta años he luchado con inquebrantable valor contra las mezquinas miserias de la vida; pero, al fin, el laboratorio tan deseado ha llegado. No intentaré decir el trabajo encarnizado y la perseverancia que me ha costado. Ha venido, y con él, condición más grave, quizás un poco de ocio. Digo quizás, porque aún pesa sobre mí la dura obligación de ganarme el sustento. Mi deseo se ha realizado. Algo tarde, ¡oh, bellos insectos míos!, pues temo que la caza se me presente cuando empiece a no tener dientes para comerla. Sí, es un poco tarde: los amplios horizontes del principio se han convertido en bóveda rebajada, sofocante, cada día más estrecha. [...]

En nuestras costas oceánicas y mediterráneas se fundan con grandes dispendios laboratorios donde disecar la bestezuela marina, de escaso interés para nosotros; prodíganse potentes microscopios, delicados aparatos de disección, máquinas de captura, embarcaciones, personal de pesca y acuarios para saber cómo se segmenta el vitelo de un anélido cuya importancia jamás he sabido comprender en toda su extensión, y, en cambio, se desdeña la bestezuela terrestre, que vive en perpetua relación con nosotros, que suministra a la psicología general documentos de inestimable valor y que con excesiva frecuencia compromete la fortuna pública destruyendo nuestras cosechas. ¿Para cuándo se deja el laboratorio de entomología, en el que se estudiara, no el insecto muerto, macerado en alcohol, sino el insecto vivo; un laboratorio que tuviese por objeto el estudio del instinto, las costumbres, la manera de vivir, los trabajos, las luchas y la propagación de ese mundo de seres minúsculos, con los que el agricultor y la filosofía deben contar siempre y seriamente? Conocer a fondo la historia del destructor de nuestras viñas sería quizá más importante que saber cómo termina tal o cual filete nervioso de un cirrípedo; establecer experimentalmente la demarcación entre la inteligencia y el instinto, y demostrar, comparando los hechos en la serie zoológica, si la razón humana es o no es una facultad irreductible, debería interesar mucho más que el conocimiento del número de anillos de la antena de un crustáceo. Un ejército de trabajadores sería necesario para estas enormes cuestiones, y, sin embargo, no hay nada. La moda va al molusco y al zoófito. Las profundidades de los mares se exploran con gran refuerzo de dragas; pero el suelo que pisamos sigue desconocido. Pues bien; mientras llega el momento en que la moda cambie, abro el laboratorio del harmas para la entomología viva, y este laboratorio no costará un céntimo al bolsillo de los contribuyentes."

J. H. Fabre: *Maravillas del instinto de los insectos*, capítulo I. Traducción de Felipe Villaverde. Calpe, Madrid, 1920.



El naturalista entre sus dos hijas ***La casa de Fabre en L'Harmas***

explicación generalizada. Sin embargo, Fabre estaba esencialmente en lo cierto en las especies que estudió. Advirtió la existencia de variaciones individuales en su comportamiento, como la localización de los aguijonazos y el número de los mismos en la presa. Pero, por mucho que le impresionara la permanencia de esos comportamientos complejos, consideró que las variaciones individuales sólo eran excepciones de pautas comportamentales fijadas en la especie.

La revolución darwiniana promovió una interpretación diferente de la variación comportamental. Para los darwinistas, un comportamiento típico no se correspondía con un arquetipo invariable. Más bien representaba sólo el comportamiento más común de la población y, por tanto, estaba destinado a evolucionar por selección natural. Sin embargo, hasta que se comprendió la naturaleza de la herencia, así como la genética de poblaciones, la creencia en una selección direccional —esto es, selección persistente para ciertos caracteres— no podía ser más que un acto de fe. Esta es la razón por la que muchos científicos del siglo XIX y principios del XX no podían aceptar el mecanismo de la selección natural, aunque estuvieran completamente convencidos del hecho de la evolución. Pero Fabre no separó esos dos componentes. Al no poder aceptar la selección natural, rechazó la evolución, que para él no era más que una teoría para biólogos de salón. Por añadidura, la noción de una transición imperceptible de la inteligencia desde los animales a los humanos parecía contraria a muchas de las conclusiones deducidas de sus investigaciones preferidas.

Pero en *Souvenirs* se observa claramente que el tema le preocupaba mucho; en parte, como confesaba, porque el mero rechazo de la evolución "no explica nada". Sus conocimientos paleontológicos le recordaban, a veces dolorosamente, su propia inconsistencia al respecto. En ocasiones, no podía evitar expresarse como un evolucionista, como se muestra en esta reflexión de 1901, en la que se adelantaba a su tiempo de manera notable: "Me tomo interés por un poco de verdín; ...atisbo en mi imaginación tiempos antiguos, cuando esas conferva [cianobacterias, o algas azules], las primeras plantas nacidas, esbozaban una atmósfera respirable para la vida venidera. Lo que tengo ante mis ojos, entre las paredes de mi acuario, me muestra la historia de este planeta envolviéndose en aire puro."

¿Llegó Fabre a leer *Sobre el origen de las especies*? No hay forma de contestar a esta pregunta clave. Cuando L'Harmas pasó a formar parte del patrimonio de Francia, en 1922, el último hijo de Fabre ya había vendido la biblioteca de su padre. En una carta que todavía se conserva en L'Harmas, Darwin le agradece a Fabre el envío de *Souvenirs*, añadiendo, "no creo que nadie en Europa haya admirado más sinceramente sus investigaciones que yo". Quizá Darwin le devolviera el gesto enviándole a su vez un ejemplar del *Origen*. Puesto que Fabre se burló posteriormente del aserto de Darwin de que "una pequeña dosis de juicio o razón... suele aparecer aun en los animales situados más abajo en la escala de la naturaleza", supongo que Fabre leyó por lo menos hasta esa frase en el capítulo sobre el instinto, es decir, hasta el final de su primera página.

No infiera el lector de estos desacuerdos que Fabre minusvalorara a Darwin. Es posible que recibiera más cartas profesionales de Darwin que de ningún otro, y pulía su inglés para esas ocasiones. A través de la correspondencia, Darwin participaba intensamente en los experimentos de Fabre sobre los instintos de retorno a la colmena de las abejas constructoras. Cuando Darwin murió, se dice que Fabre lloró.

Sin embargo, el rechazo por parte de Fabre de la evolución como concepto general es un buen ejemplo de cómo incluso los científicos más brillantes pueden quedar cegados por una idea preconcebida, lección que es especialmente irónica en el caso de Fabre porque estaba obsesionado por evitar prejuicios en su trabajo. Es más, la animosidad de Fabre contra los prejuicios llegaba hasta un desdén excesivo hacia las teorías en general. Pero no se puede hacer biología sin teorías: éstas surgen de las hipótesis refutables en las que se basa todo experimento. Las teorías se vuelven malas teorías cuando se convierten en dogmas.

Por desgracia, Fabre tendía a ser dogmático. Por ejemplo, su rechazo de la evolución y de las explicaciones evolutivas para el mimetismo distorsionó completamente sus estudios sobre la araña cangrejo *Thomisus onustus*. Colóquese a un *T. onustus* sobre cualquier flor y en un día o dos adoptará sin decepcionarnos el color de la flor: blanco sobre flores blancas, amarillo sobre flores amarillas, rosa con venosidades púrpuras sobre flores rosas con venosidades púrpuras. Fabre escribe que cuando la presa aparece, "el thomisus, un bandido al acecho cubierto por las flores, sale de su escondite". Pero la araña nunca se esconde: está siempre a la vista de todos, aunque en un lugar que no destaca, y sobre conjuntos de flores, llamadas inflorescencias, parece como si fuera justo una florecita más. El "observador inimitable" iba mal encaminado por sus propios sesgos.

De la misma manera, Fabre rechaza la explicación evolutiva por la que algunos insectos simulan estar muertos. Mediante ese comportamiento, esos insectos evitan la acción de depredadores como lagartos y aves insectívoras. Fabre decidió, sin embargo, que los insectos no podían simular la muerte, porque no tenían noción de la misma. Prefería pensar que la inmovilidad de los insectos obedecía a una especie de hipnosis inducida "por el miedo". Los capítulos de *Souvenirs* sobre este tema son deliciosos, pero los datos de Fabre están teñidos de subjetivismo, y sus experimentos son irrelevantes.

Ciertamente, en una obra de tiempos pasados y de 4000 páginas siempre se podrá detectar algún gazapo que otro. Pero se le pueden perdonar de corazón a quien abrió un nuevo mundo de conocimiento a sus coetáneos y dio al lector corriente la oportunidad de criticar los métodos de un buen investigador, así como la de indagar en sus opiniones. A juzgar por los éxitos conseguidos por los científicos de Japón, EE.UU. y otros países que han sido lectores devotos de Fabre, me atrevería a decir que su postura en contra de la teoría darwiniana de la evolución no ha producido daños apreciables sobre su efecto esclarecedor para las mentes jóvenes.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FABRE, POET OF SCIENCE. G. V. Legros. Dodd, Mead and Company, 1913.

THE STUDY OF INSTINCT. Niko Tinbergen. Oxford University Press, 1969.

ACTES DU CONGRÈS JEAN-HENRI FABRE. Dirigido por Yves Delange. Leopard d'Or, París, 1986.

STINGING BEHAVIOUR OF SOLITARY WASPS. André L. Steiner en *Venoms of the Hymenoptera*. Dirigido por T. Piek. Academic Press, 1986.

THE OXFORD COMPANION TO ANIMAL BEHAVIOUR. Dirigido por David McFarland. Oxford University Press, 1987.

Efecto túnel cuántico en polos magnéticos

La observación de la relajación magnética, a bajas temperaturas, en diferentes sistemas, permite descubrir fenómenos cuánticos de efecto túnel

Javier Tejada y E. M. Chudnovsky

Los imanes atraen clavos, plumillas, llaves y demás objetos de hierro. Si suspendemos un imán de un hilo apuntará siempre hacia el norte. La invención de la brújula por los chinos, en torno al siglo XI, se basó en ese fenómeno; una brújula no es más que un imán que puede girar libremente. Gracias al trabajo de los físicos de los siglos XVIII y XIX, sabemos que ese algo misterioso que genera la atracción entre imanes es el campo magnético.

Para representar el campo magnético imaginamos líneas invisibles que atraviesan cualquier punto del espacio. La densidad de las líneas es proporcional a la magnitud del campo; la dirección de las mismas determina la orientación de la brújula. La Tierra constituye un gran imán. Las líneas que representan el campo magnético terrestre son casi paralelas a los meridianos terrestres. Este campo, pese a su extrema debilidad, es capaz de orientar una brújula en la dirección de sus líneas de campo.

Para mostrar la estructura del campo que crea un imán, denominamos polo norte y polo sur magnéticos a cada uno de los extremos. La interacción entre dos imanes, por ejemplo la Tierra y la brújula, se puede explicar como una fuerza de atracción entre dos polos distintos y una fuerza de repulsión entre polos iguales. Podemos, pues, afirmar que la brújula se orienta a lo largo de un meridiano porque su polo norte magnético es atraído por el polo sur magnético de la Tierra y el polo sur, por el polo norte magnético de ésta.

Para aludir a la intensidad del magnetismo en el hierro o cualquier otro sólido, hablamos de momento magnético, M. Los buenos imanes poseen momentos magnéticos grandes. El portador elemental del magnetismo en los sólidos es el electrón, cuyo momento magnético, predicho por la teoría cuántica, recibe el nombre de magnetón de Bohr.

En un sólido no magnético, el cobre por ejemplo, los momentos magnéticos de los electrones están orientados aleatoriamente en el espacio y se contrarrestan entre sí; el momento magnético resultante es cero. En un sólido magnético —el hierro—, muchos electrones tienen sus momentos magnéticos orientados en una misma dirección; sumados, originan un momento magnético macroscópico y constituyen el fenómeno del ferromagnetismo.

1. ORIENTACION de los polos magnéticos de una brújula en el seno del campo magnético terrestre. Las líneas que representan este campo magnético corren casi paralelas a los meridianos.

Sustancias ferromagnéticas comunes son el hierro, el cobalto, el níquel y sus aleaciones correspondientes; en un centímetro cúbico de estos materiales hay unos 10^{23} electrones, cuyos momentos magnéticos pueden llegar a orientarse en la misma dirección. Si se multiplica el magnetón de Bohr por este número resulta que el valor del momento magnético de un material ferromagnético es $M \sim 10^3$ emu por centímetro cúbico ("emu" es la unidad de momento magnético en el sistema electromagnético de unidades). El efecto del ferromagnetismo desaparece a una temperatura superior a la de Curie, que para el hierro es de 1043 grados C.

La mayoría de los objetos de hierro que utilizamos en la vida diaria no son imanes. Se comportan como tales después de colocarlos bajo la influencia de un intenso campo magnético. Ello se debe a que el orden ferromagnético (esto es, el alineamiento paralelo de los momentos magnéticos de los electrones) no es uniforme en los sólidos, sino que en el interior de éstos aparecen dominios de orientación dispar.

El tamaño de los dominios ferromagnéticos abarca entre un micrometro y décimas de milímetro, variación que depende de la dirección e intensidad del último campo

JAVIER TEJADA y E. M. CHUDNOVSKY llevan varios años estudiando el efecto cuántico en los fenómenos de magnetización. Tejada es catedrático del estado sólido en la Universidad de Barcelona. Chudnovsky, miembro de la Sociedad Americana de Física, enseña en la Universidad metropolitana de Nueva York.

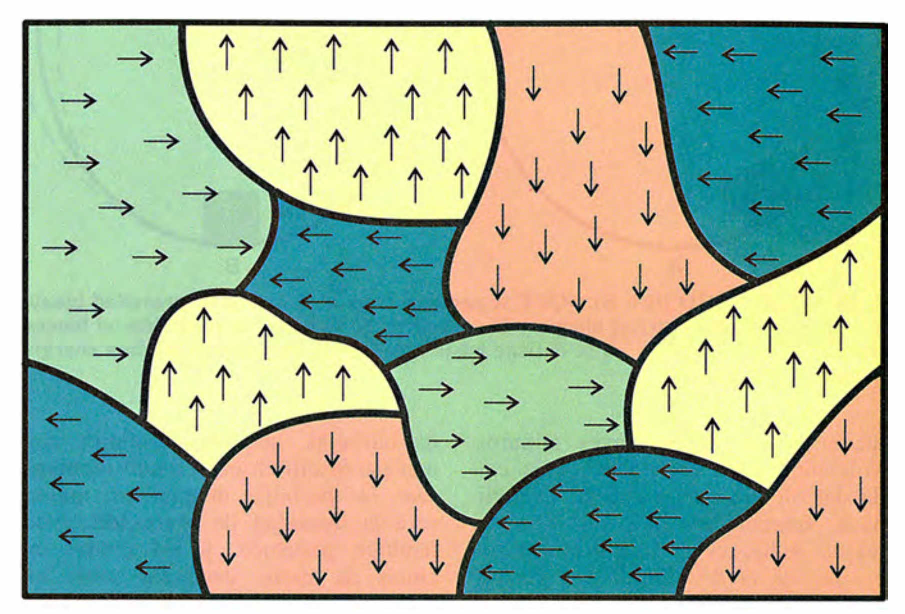
magnético que haya actuado sobre el sólido. Entre cada par de dominios, hay una pared de separación cuya anchura está entre 0,01 y 0,1 micrometros; a través de la misma los momentos magnéticos van pasando de la orientación espacial que tienen en uno de los dominios a la que tienen en el otro. Cuando el momento magnético neto no es cero, el cuerpo se comporta como un imán, con sus polos magnéticos bien definidos, y genera un campo magnético en el espacio que lo rodea.

La teoría electromagnética exige que aparezcan dominios magnéticos para que el sólido alcance el estado de mínima energía. Imaginemos un sólido ferromagnético que, por efecto de un campo magnético externo, quede imantado de manera uniforme. Una vez retirado el campo externo, el sólido se comportará como un imán que crea su propio campo. Cuanto mayor sea el momento magnético del sólido, mayor será el campo magnético que genere.

Para rebajar la energía del sólido asociada al campo magnético, hay que reducir el momento magnético, y ésta es la causa de que aparezcan los dominios. Dicho proceso comienza en el momento en que se retira el campo externo; si se tratara de un sólido cristalino perfecto, sin impurezas ni defectos, el proceso, cuya duración sería de una fracción de segundo, debería acabar cuando el momento magnético del sólido fuese cero.

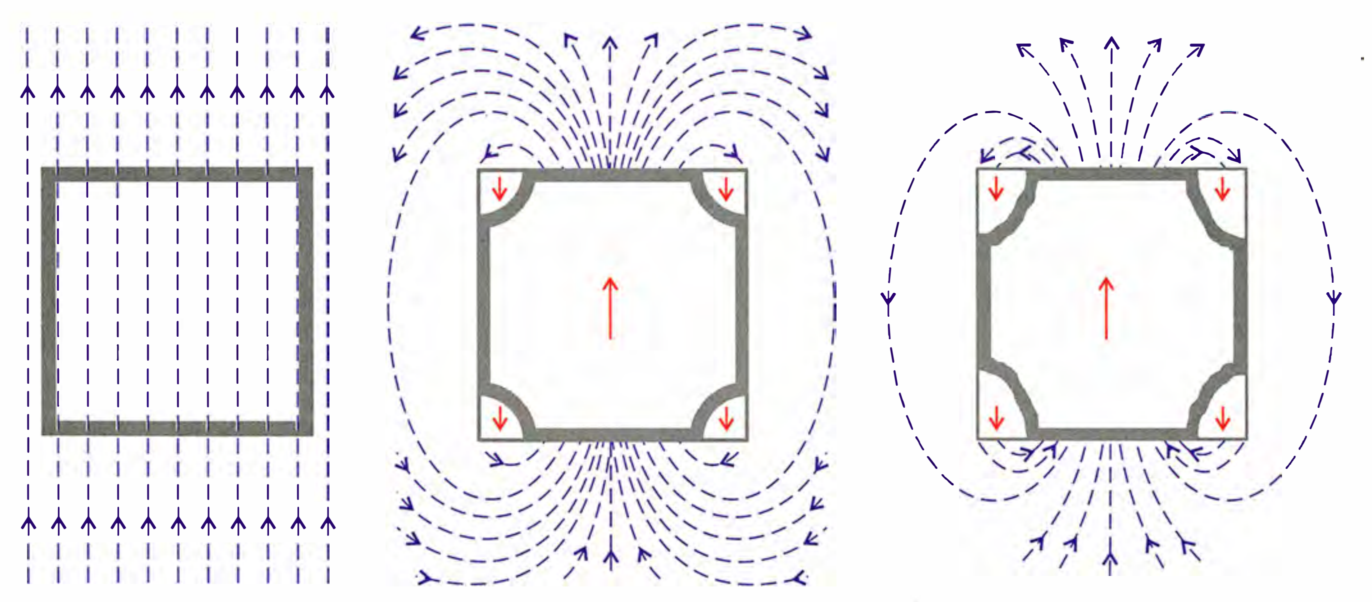
Los sólidos reales abundan en defectos, que impiden que las paredes de dominio se muevan libremente por el interior del sólido. Conforme decaen el momento magnético del sólido y el campo generado, disminuye la fuerza que hace mover las paredes; esta fuerza acaba por igualarse con la fuerza que se opone al movimiento de las paredes, lo que ocurre mucho antes de que el momento magnético total sea cero. La fuerza que se opone al movimiento de las paredes se origina en los defectos e impurezas del sólido.

Para comprender el proceso, recordemos qué sucede en la caída de un cuerpo sobre una superficie inclinada no plana. Si hay rozamiento, la posición de equilibrio alcanzada por el sólido no será la de la mínima energía potencial, sino aquella que iguale la fuerza de la gravedad con la de rozamiento. De igual modo, los cuerpos ferromagnéticos continúan imantados después de haberles sido aplicado un campo magnético.



2. DOMINIOS MAGNETICOS de un material ferromagnético. El tamaño de cada dominio es del orden de 1 micrometro. La pared que separa dos dominios posee una extensión típica de 0,01 micrometros.

El momento magnético de un imán desaparece con el transcurso del tiempo. A temperatura ambiente, este proceso puede durar cientos de años; pero si calentamos el imán, siempre por debajo de la temperatura de Curie, el proceso se acelera y la desiman-



3. UN CAMPO MAGNETICO EXTERNO, suficientemente elevado, permite imanar de manera homogénea un material (*izquierda*). Al anular el campo externo, es el propio material, por medio de su momento magnético remanente, el que crea el campo a su alrededor (*centro*). Para reducir la energía del material, aparecen dominios en su interior cuyos momentos magnéticos poseen orientaciones contrarias al momento magnético remanente (*derecha*).



4. EL EQUILIBRIO DEL BLOQUE se produce cuando la fuerza de gravedad iguala a la de rozamiento entre el bloque y la superficie. Si agitamos la superficie, el bloque reinicia su movimiento y no se detiene hasta alcanzar la posición de mínima energía potencial gravitatoria.

tación puede tardar breves minutos. Volvamos, para entenderlo, a la caída del bloque por la superficie inclinada. Imaginemos que, una vez detenido el bloque en una posición por encima de la de mínima energía potencial, provocamos que vibre la superficie inclinada; el cuerpo torna a ponerse en movimiento y se desliza hasta la posición más baja, permaneciendo allí. En un sólido ferromagnético la vibración atómica se debe a la temperatura; cuanto más suba ésta, más fácilmente se moverán las paredes del dominio.

La energía térmica no sólo permite que las paredes de dominio venzan la fuerza que las mantiene unidas a defectos e impurezas, sino también que se desplacen por el interior del sólido ferromagnético y, por tanto, se anule el momento magnético del sólido. Decimos entonces que se ha producido un proceso de relajación magnética.

La imagen de la relajación magnética nos induce a pensar que un imán conserva su magnetización mientras persista a temperaturas cercanas al cero absoluto. Pero es una inferencia falsa. La relajación de las propiedades magnéticas puede darse incluso en el cero absoluto, como acaban de descubrir los autores, un hallazgo, por otro lado, de interés en la industria basada en el almacenamiento magnético de datos, voces o imágenes.

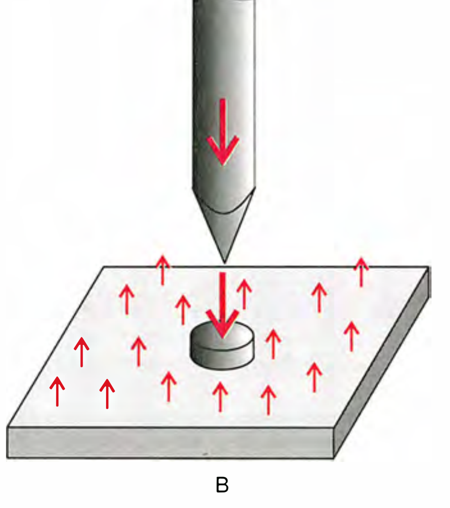
En efecto, en la grabación magnética encuentran hoy los materiales ferromagnéticos una de sus principales aplicaciones. La posibilidad de almacenar información en una cinta magnética depende de la existencia de burbujas, que son dominios con una pared cilíndrica. Cuanto menores sean las burbujas magnéticas, mayor será la densidad de grabación. Pero también podemos, y así ocurre en cintas de audio, depositar sobre un sustrato no magnético partículas ferromagnéticas, partículas que no tienen dominios magnéticos. (Esta explicación de una cinta de grabación en términos de partículas monodominio responde a una visión idealizada; en realidad, algunas de las partículas de las cintas poseen dominios magnéticos. El cambio de dirección del momento magnético de las partículas multidominio se produce por el movimiento de las paredes de dominio.)

En un sólido ferromagnético con muchos dominios, el volumen ocupado por las paredes de dominio es mucho menor que el de los propios dominios, en los que existe una imantación uniforme. Sin embargo, crear siquiera sea una sola pared de dominio en una partícula pequeña depositada sobre una cinta cuesta bastante energía: la partícula prefiere tolerar el campo magnético generado por su momento magnético antes que permitir que aparezca una pared de dominio en su interior.

Así pues, una partícula ferromagnética es un pequeño imán con una cierta localización de los polos magnéticos norte y sur. El tamaño de una brújula es mucho mayor que el de estos pequeños imanes en los que hay, como máximo, algunos miles de millones de átomos. En el mundo de la física se denomina mesoscópicos a los objetos de este tamaño, para distinguirlos de los objetos macroscópicos de nuestro hacer cotidiano y de los sistemas atómicos del mundo microscópico. La posición de los polos norte y sur de un imán mesoscópico viene determinada tanto por la estructura cristalina del sólido como por la forma de la partícula. Se denomina eje de fácil imantación a la línea que conecta entre sí los dos polos magnéticos.

Como consecuencia de la invariabilidad de las leyes físicas ante una inversión temporal, la partícula mesoscópica magnética, en ausencia de campo magnético externo, poseerá la misma energía en cualquiera de los dos estados obtenidos del intercambio de los polos magnéticos; existirá la misma probabilidad de encontrar la partícula en un estado que en otro. Además, en dichos estados la energía de la partícula es mínima. Hacer que los polos de la misma ocupen otras posiciones diferentes cuesta trabajo, es decir, debemos suministrar energía para cambiar la orientación del momento magnético de la partícula. Esta energía la puede suministrar un campo externo cuya dirección forme cierto ángulo con el eje de fácil imantación. Pero tan pronto anulemos el campo magnético externo, los polos magnéticos volverán a sus posiciones iniciales y elegirán una u otra localización, siempre de mínima energía, dependiendo de la dirección seguida por el campo aplicado.

Ciertas cintas de audio están fabricadas de partículas ferrimagnéticas de dióxido de cromo. (Una sustancia es ferrimagnética cuando los momentos magnéticos de sus átomos constituyen dos redes entrecruzadas, de manera que en cada una de ellas los momentos son paralelos entre sí y antiparalelos a los de la otra, y de intensidades diferentes en cada red.)



5. LAMINA DELGADA ordenada ferromagnéticamente (*izquierda*). Al acercar un imán con momento magnético opuesto al de la lámina, se invierte la orientación de unos pocos momentos magnéticos formando una burbuja magnética cilíndrica (*derecha*), que abarcaría la lámina si ésta fuera perfecta.

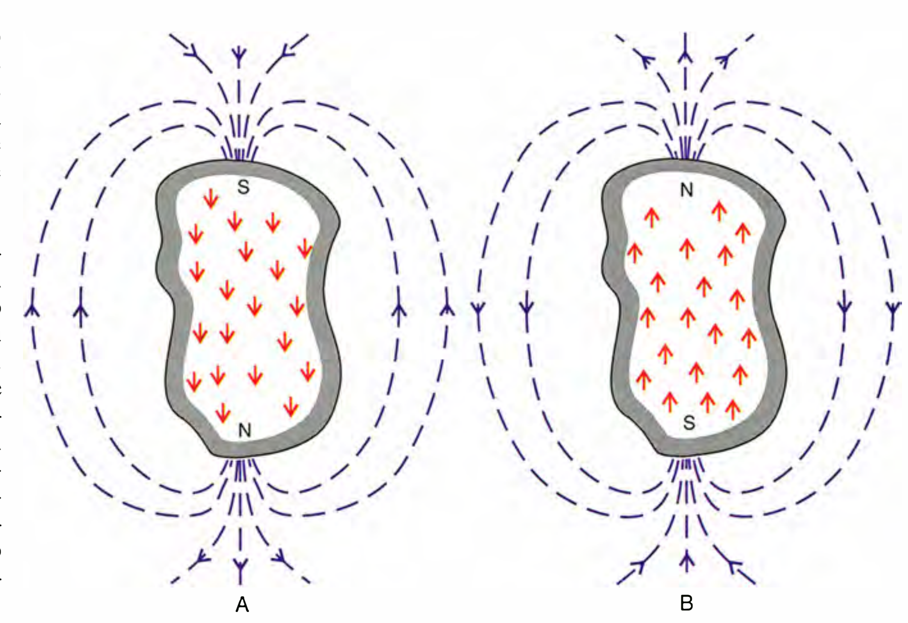
Si acercamos a la cinta un pequeño imán en forma de aguja, podemos invertir el momento magnético de las partículas contenidas en una pequeña área de la misma. Este conjunto de partículas constituirá una unidad de grabación magnética.

La miniaturización en grabación magnética guarda estrecha relación con la posibilidad de reducir el tamaño de la unidad de memoria, lo que a su vez reviste especial importancia en la tecnología de computadores, que, de continuar al ritmo actual de evolución, dentro de dos décadas podrían utilizar unidades de memoria magnética que contuvieran sólo 1000 átomos, lo que significa producir partículas metálicas o de óxidos de hierro y cromo de un tamaño de unos pocos angstroms de radio.

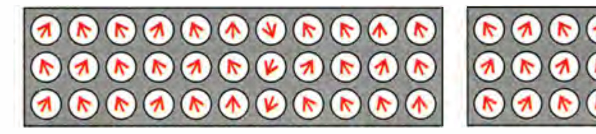
¿Qué dificultades habrá que superar para conseguir esos ordenadores de memoria magnética gigantesca? Una cosa está clara: cuanto menores sean las unidades de memoria, antes perderán sus propiedades magnéticas, ya que los procesos de nucleación espontánea o de relajación ocurrirán con mayor probabilidad. Estos defectos son los causantes del "ruido magnético" y de la pérdida de memoria. La estabilidad del momento magnético de las partículas depende del tamaño, la composición y estructura de las mismas, así como de los campos electromagnéticos exteriores. Pero el factor más determinante es la temperatura.

Hemos dicho que la temperatura equivale a la agitación de los átomos del sólido en el que se produce el orden ferromagnético. En el caso de que las memorias magnéticas sean muy pequeñas, cualquier "convulsión" puede ser el detonante de la reorientación espontánea de los momentos magnéticos. Esto es lo que sucede en nuestros modernos dispositivos a temperatura ambiente como consecuencia de la activación térmica de las paredes de dominio. El calentamiento de una casete de audio en un día de verano es la causa de la pérdida de su calidad de sonido. Si redujéramos el tamaño de las partículas, las casetes deberían operar a temperaturas inferiores a las ambientales.

Pero, ¿existe un límite de tamaño de la unidad de memoria magnética? ¿Puede constituirse ésta con unos pocos átomos? La teoría nos dice que esto no es posible, ni siquiera en el límite del cero absoluto. A bajas temperaturas el orden ferromagnético está perfectamente establecido y podríamos pensar que adquiere su máxima estabilidad, si no fuera por la aparición de los efectos cuánticos.



6. PARTICULAS MAGNETICAS MONODOMINIO. La dirección y orientación del momento magnético vienen marcadas por los polos magnéticos. Dos partículas idénticas poseen la misma energía aunque sus polos magnéticos estén invertidos. Para invertir los polos de una partícula hay que realizar un trabajo.



7. IMANTACION de una cinta magnética por un campo externo. Si invertimos el campo en una pequeña zona, se invierte el momento magnético de algunas partículas, formándose así una unidad de memoria magnética.

Pero, de acuerdo con nuestro hallazgo, los polos norte y sur magnéticos de un imán de tamaño mesoscópico pueden intercambiarse súbitamente debido al denominado efecto túnel cuántico. Otros efectos, como son la nucleación de burbujas magnéticas y la liberación de las paredes de dominio de los defectos en materiales ferromagnéticos, se explican también mediante el efecto de túnel cuántico. En todos estos casos, el momento magnético del imán no se comporta como un vector clásico, a la manera predicha por André Marie Ampère, sino que se comporta de forma cuántica.

La física cuántica descansa sobre el principio de indeterminación, que nos dice que no podemos conocer con precisión la posición y el momento de un objeto. Siempre habrá cierto grado de indeterminación en la posición. Dicha indeterminación es una propiedad de los objetos más que una consecuencia de nuestra incapacidad para realizar una medición absolutamente exacta. En el caso de los objetos macroscópicos, no hay posibilidad experimental de detectarla. De todos modos, cuanto más ligero sea el objeto, mayor será la indeterminación de su posición.

El principio de indeterminación tiene otras virtualidades. Veámoslo con algunos ejemplos. En mecánica clásica, un centímetro cúbico de un sólido que contenga 10^{23} cargas eléctricas positivas y negativas siempre será inestable. Las fuerzas eléctricas presentes en un plasma así harían que éste se expandiese indefinidamente; por tanto, la existencia de los propios sólidos es una manifestación macroscópica de la mecánica cuántica.

El que el helio no solidifique a bajas temperaturas constituye otro ejemplo de fenómeno cuántico. A temperatura ambiente y presión atmosférica, el helio es un gas que se hace líquido a –269 ºC, que no se solidifica ni tan siquiera a temperaturas cercanas al cero absoluto (–273 ºC). Para solidificar el helio a temperaturas tan bajas, hay que aplicar una presión de 30 atmósferas. ¿Cuál es, pues, la diferencia entre el helio y el nitrógeno, que se solidifica a –210 ºC? Sabemos que cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la amplitud de oscilación de los átomos de un cristal respecto a sus posiciones de equilibrio. Cuando el nitrógeno sólido está a la temperatura de –210 ºC, la amplitud de las oscilaciones atómicas es comparable con la distancia entre átomos. Esta

es la razón por la cual el nitrógeno sólido se funde a dicha temperatura.

A temperaturas más bajas, la amplitud de las oscilaciones disminuye. En el límite del cero absoluto, la física clásica sostiene que las oscilaciones atómicas desaparecen; en consecuencia, todas las sustancias deberían solidificarse en dicho límite. Sin embargo, las oscilaciones atómicas persisten incluso hasta en el cero absoluto. Ello se debe también al principio de indeterminación. En 1988, uno de los autores (Chudnovsky) y L. Gunther demostraron que los polos magnéticos de un imán mesoscópico eran muy ligeros y, en virtud del efecto túnel, intercambiaban sus posiciones. Por ello, la indeterminación en dichas posiciones es grande y la configuración magnética de una cinta que contiene imanes mesoscópicos nunca es estable.

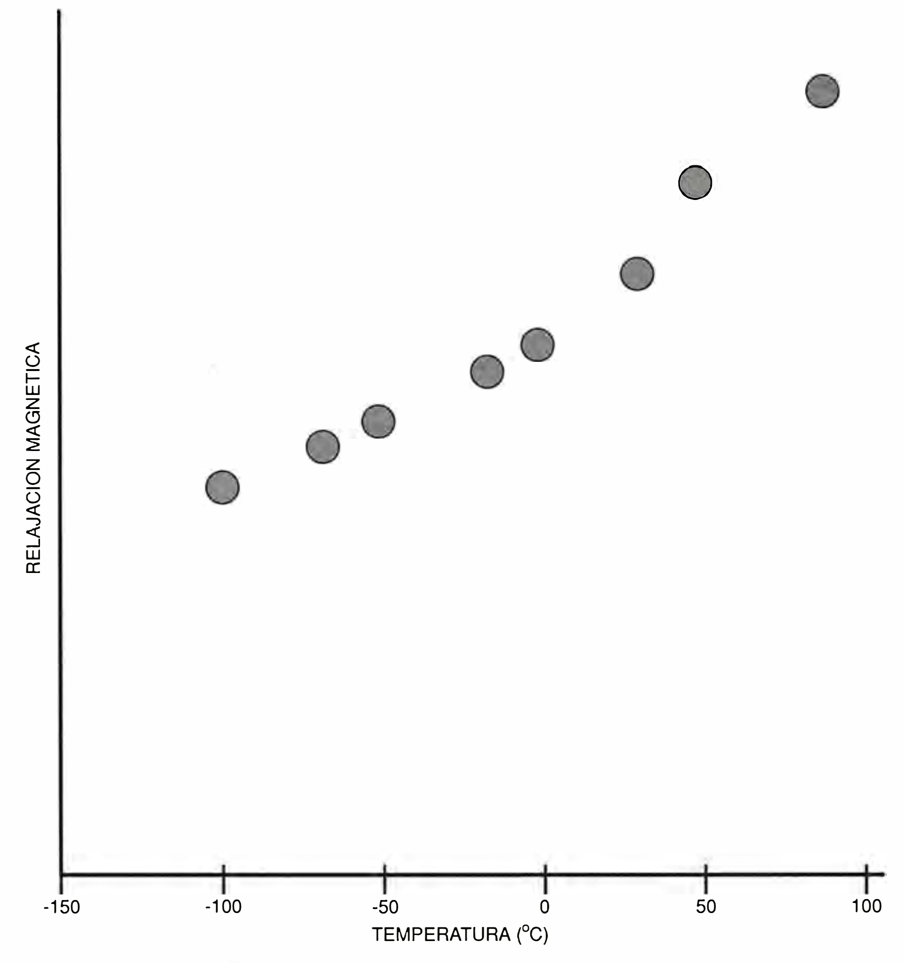
En el nitrógeno y otros cristales, la amplitud de las oscilaciones cuánticas es pequeña, comparada con la distancia interatómica. En el helio, sin embargo, las oscilaciones cuánticas tienen una gran amplitud, incluso en el cero absoluto. La razón estriba en que los átomos de helio son muy ligeros e interaccionan débilmente entre sí. La indeterminación cuántica en las posiciones atómicas es mayor que la distancia entre átomos, lo que hace imposible, a presión normal, el orden cristalino en el helio. A bajas temperaturas el ruido cuántico destruye la red del sólido. En los materiales ferromagnéticos a baja temperatura, existe un efecto similar denominado ruido cuántico magnético.

El aspecto más importante del comportamiento de los imanes de tamaño mesoscópico es que la reorientación de sus polos magnéticos tiene lugar debido al efecto túnel cuántico. Se entiende por efecto túnel el hecho de que una partícula elemental, como el electrón, confinada en un volumen pueda desaparecer del mismo y reaparecer fuera de sus paredes. El efecto túnel es una consecuencia insólita de la mecánica cuántica. Cuando a un metal se le aplica una tensión eléctrica, hay electrones que se escapan de éste debido al efecto túnel. Según la mecánica clásica, el electrón está dentro o fuera del metal; en cambio, según la mecánica cuántica, hay una indeterminación en la posición del electrón, un estado de superposición. Que se detecte al electrón fuera del metal tiene una cierta probabilidad.

Importa entender que esta descripción probabilística del electrón no tiene nada que ver con nuestra incapacidad de adquirir suficiente información del estado de dicha partícula. Es la propia naturaleza cuántica del electrón la que da origen a la indeterminación en la posición. La observación experimental destruye la indeterminación. Dependiendo del resultado de la medición, el electrón se encontrará definitivamente dentro o fuera del metal.

¿Se puede manifestar el efecto túnel cuántico en un sistema que contenga un gran número de átomos? Erwin Schrödinger sacó a la luz la situación paradójica que se crea cuando un sistema macroscópico aparece como superposición de dos estados mediante el ejemplo del "gato de Schrödinger". Imaginemos que tenemos un gato dentro de una jaula de paredes opacas, en cuyo interior hay una pequeñísima cantidad de material radiactivo. En realidad sólo se necesita la presencia de un átomo. La partícula emitida por el núcleo atómico, una partícula α, se detecta mediante un contador Geiger que pone en marcha el dispositivo que envenena al gato. Lo paradójico de esta situación es que, según la mecánica cuántica, el estado del átomo radiactivo es siempre una superposición de dos estados: el que corresponde al átomo sin haberse desintegrado todavía y el estado del átomo después de haber sufrido la desintegración radiactiva. Por tanto, y sin que sea necesario mirar lo que hace el gato, deberemos aceptar que éste se encuentra también en una superposición de dos estados, en uno de los cuales el gato está muerto, y vivo en el otro.

Basta con abrir la caja, o realizar la medición, para que el gato se encuentre de manera determinada en uno de los dos estados: el de la vida o el de la muerte. Antes de abrir la caja habría que pensar que el estado del gato es indeterminado, y no sólo por nuestra falta de información acerca de lo que hace el gato dentro de la caja, sino también porque se trata de un objeto cuántico. Según la mecánica cuántica, hay una onda que es la superposición de los estados de vida y de muerte. El problema que plantea el gato de Schrödinger lo resolvió Anthony Leggett, quien advirtió que existe una interacción entre el gato y su entorno idéntica a



8. EVOLUCION DEL RUIDO MAGNETICO, o relajación magnética, de una cinta de audio con la temperatura. El ruido aumenta con la temperatura porque así lo hace la probabilidad de que las unidades magnéticas de memoria pierdan la dirección marcada en el proceso de grabación.

la que tiene lugar con el aparato de medida.

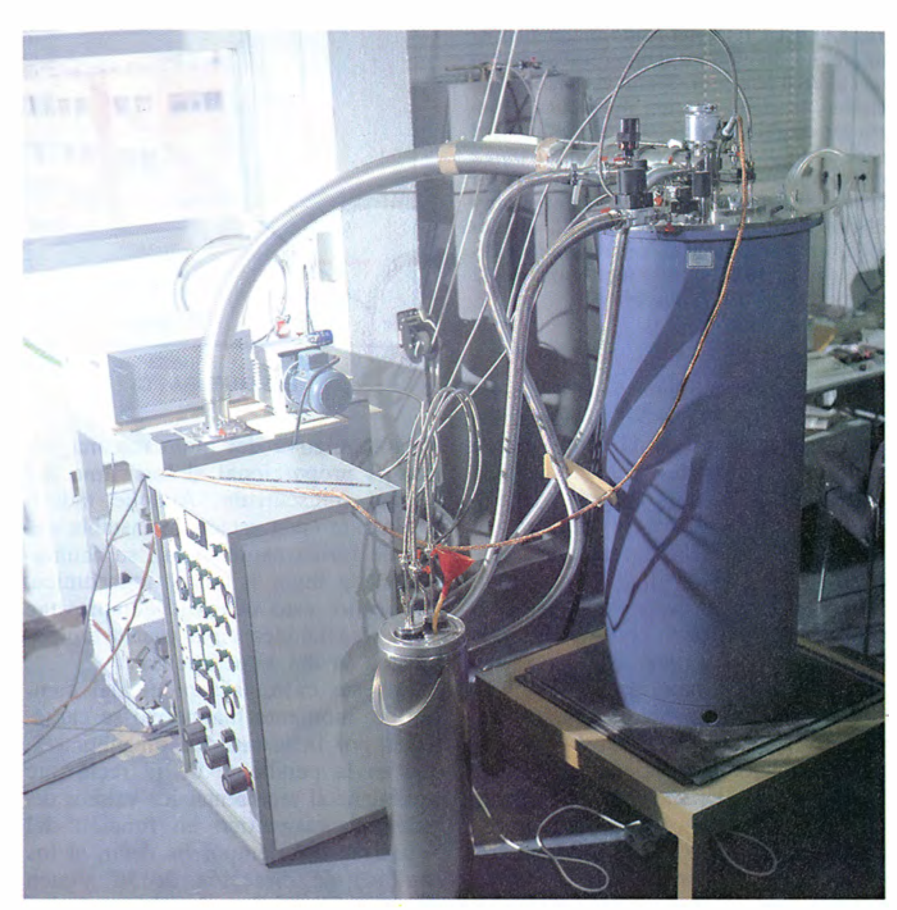
Independientemente de que abramos o no la caja, siempre habrá interacción entre el gato y su entorno, y se podrá afirmar que, del mismo modo que ocurre con la medición, llevará al gato a uno de los dos estados clásicos, el de vida o el de muerte. El gato no se encontrará nunca en el estado cuántico de superposición. La teoría elaborada por Leggett demuestra también que sí es posible que ocurra la superposición cuántica de dos estados macroscópicos clásicos a pesar de que el "gato de Schrödinger" parezca contradecirlo.

Desde la aparición de las ideas de Leggett, a comienzos de los años ochenta, los físicos han buscado sistemas de tamaño macroscópico y mesoscópico en los que se pueda observar el efecto túnel cuántico. Si dichos sistemas interaccionan muy débilmente con su entorno, pueden llegar a existir en un estado cuántico que consista en la superposición de dos estados clásicos. Posiblemente, los imanes de tamaño mesoscópico son los mejores sistemas para encontrar fenómenos cuánticos de efecto túnel y superposición: bajo ciertas circunstancias, los polos magnéticos de estos imanes pequeños, o lo que es lo mismo, su momento magnético, pueden cambiar su orientación debido al efecto túnel.

Aparte del interés intrínseco que poseen estos fenómenos cuánticos, ofrecen también la posibilidad de utilizar el efecto túnel para desarrollar una nueva tecnología de computadores.

Supongamos que tenemos un computador cuyas unidades de memoria sean nuestros imanes mesoscópicos. La lógica de este computador podrá estar basada en el sistema binario: Sí (N – S), No (S – N). Si el imán fuera de tamaño macroscópico, no podrá haber efecto túnel de los polos y el estado de la unidad de memoria magnética será el "sí" o el "no". Pero si el imán fuera de tamaño mesoscópico y se diera el efecto túnel de los polos, el estado de la unidad de memoria sería: Sí + No, y la probabilidad de encontrar la unidad de memoria magnética en los estados "sí" y "no" dependería de su interacción con los dispositivos de escritura y lectura. Este computador se basaría en una lógica cuántica. Los imanes de tamaño mesoscópico abren, pues, una nueva posibilidad de construcción del computador de lógica cuántica.

Desde comienzos de los años ochenta, han sido varios los grupos experimentales que han intentado detectar el efecto túnel cuántico del momento magnético y observar los estados cuánticos que aparecen, en presencia del efecto túnel, a causa de la superposición de estados de momento magnético opuesto.



9. INSTALACIONES CRIOGENICAS de la Universidad de Barcelona, en las que se realizan experimentos entre 300 y 0,03 grados kelvin. En estos experimentos se buscan nuevos fenómenos en materiales magnéticos y superconductores.

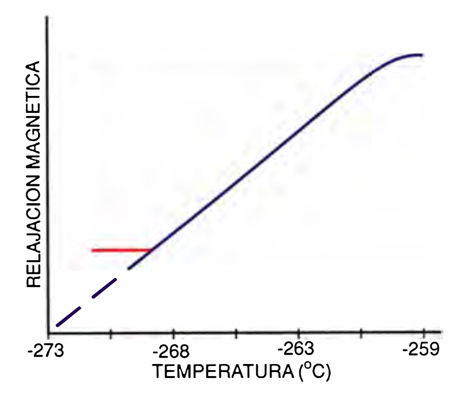
Los principales resultados experimentales se han conseguido a través de dos métodos diferentes. En el propuesto por David Awschalom y sus colaboradores, de IBM y la Universidad de California en Santa Bárbara, se trata de aplicar a una muestra un campo magnético oscilante y ver si se produce un fenómeno de resonancia; dicha resonancia estaría relacionada con la existencia de estados de superposición cuántica de los polos magnéticos. Mas, para observar la resonancia, todos los imanes deben ser iguales, con el mismo tamaño y forma, lo que resulta imposible. Por ello, y teniendo en cuenta también algunas consideraciones teóricas planteadas por Aupam Garg, de la Universidad de Illinois, puede ser que la resonancia que se observa en estos experimentos no sea debida a la transición entre los estados cuánticos que se buscaban.

El otro método experimental se basa en la idea de la relajación magnética y no depende de la perfección del material. Este método ha sido propuesto por uno de los autores (Tejada) y seguido también por Barnard Barbara, del CNRS en Grenoble, J. I. Arnaudas, de la Univesidad de Zaragoza, y M. J. O'Shea, de la de Kansas. Recuérdese que la relajación magnética consiste en la variación suave y prolongada del momento magnético total que ocurre tras cambiar o anular el campo magnético que actúa sobre una colección de partículas magnéticas, imanes mesoscópicos por ejemplo.

El sistema magnético ideal para estudiar la evolución del momento magnético es el constituido por un conjunto de partículas idénticas e independientes entre sí que posean anisotropía magnética uniaxial, es decir, que sus estados con momentos magnéticos **M** y **–M** posean la misma energía.

Para que el momento magnético pase de uno a otro de esos dos estados de igual energía ha de vencer una barrera de energía. La altura de la barrera, **U**, que es la misma para todas las partículas, depende del volumen y forma de éstas. Si no están sometidas a ningún campo magnético,

10. EVOLUCION del ruido magnético de una cinta de audio a temperaturas cercanas al cero absoluto. Según el magnetismo clásico, la configuración magnética debería ser estable, desaparecer el ruido, en el cero absoluto, es decir, a –273 ºC (*línea discontinua*). Pero el comportamiento en la realidad experimental indica algo muy distinto: por debajo de –268 ºC, el momento magnético se sigue relajando y dicha relajación es independiente de la temperatura (*línea continua*).



habrá el mismo número de ellas en los estados de **M** y **–M**. Si aplicamos un campo magnético **H** muy grande podremos conseguir que todas las partículas se encuentren en el estado **M**. Pero, ¿qué ocurre si anulamos el campo externo **H**? Que las partículas recuperan el estado inicial que tenían antes de aplicar el campo. Ello les lleva un tiempo, durante el cual el momento magnético total de la muestra disminuye de forma exponencial.

En realidad, es prácticamente imposible preparar un sistema de partículas idénticas con barreras **U** iguales. Dado que **U** depende del tamaño y forma de las partículas, existe siempre una distribución de barreras de energía y la ley de evolución del momento magnético no es exponencial sino logarítmica, lo que significa que la variación relativa del momento magnético es proporcional al logaritmo del tiempo transcurrido. Aunque individualmente cada estado metastable decae de forma exponencial, su acumulación da lugar a la ley logarítmica. De hecho, esto ocurrirá siempre que haya transiciones cuya escala temporal sea la del experimento.

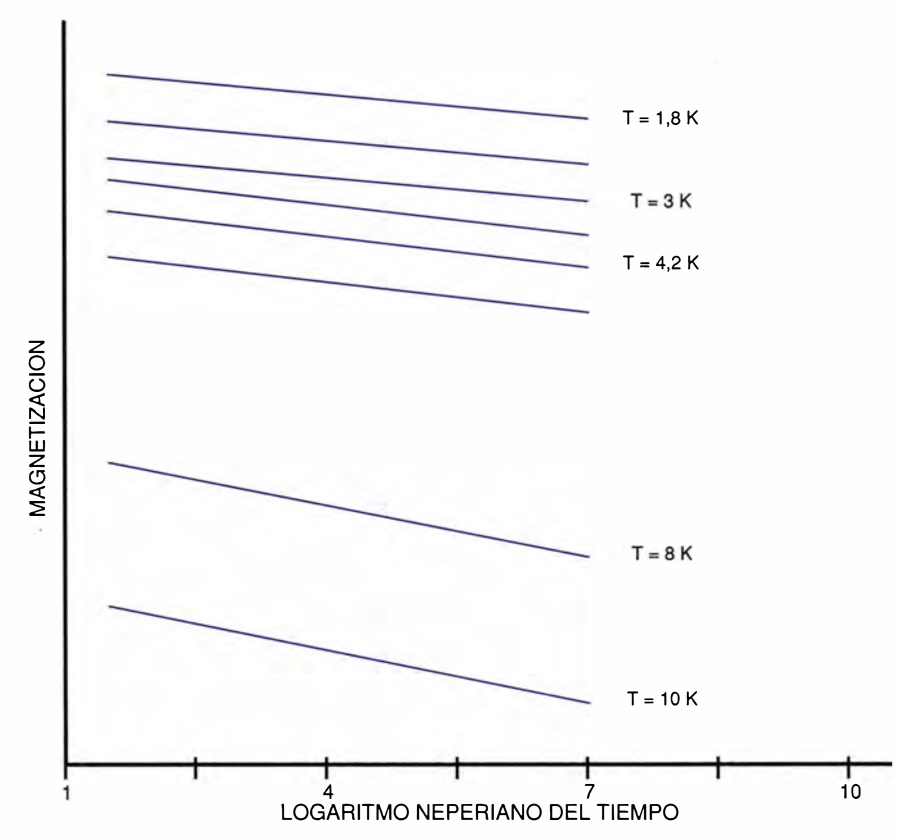
En este caso, la rapidez del cambio del momento magnético se caracteriza por la viscosidad magnética **S**, que es la pendiente de la recta que se obtiene al representar los valores del momento magnético en función del logaritmo del tiempo. Es decir, si los cambios de dirección de **M** siguen un comportamiento de física clásica **S** será una función de la temperatura; si los saltos de **M** tienen un comportamiento cuántico (**M** experimenta efecto túnel), **S** debería ser constante por debajo de cierta temperatura.

Consideremos los resultados relativos a tres materiales diferentes: partículas de CrO_2 de una cinta magnética digital compacta, aleación de Fe_3Tb de 30 angstroms de espesor y partículas antiferromagnéticas de la proteína ferritina del bazo del caballo.

Las partículas de dióxido de cromo de la cinta digital compacta tienen la forma de balones de rugby, con longitudes de sus semiejes de 300 angstroms y 1500 angstroms. Son partículas ferrimagnéticas, con un momento magnético neto **M** contenido en el plano de la cinta, y debido a su pequeño tamaño son monodominios magnéticos. Con el fin de reducir al máximo el ruido magnético y hacer posible la reproducción digital de la señal, estas partículas poseen tamaños muy similares.

La aleación Fe_3Tb se ha obtenido mediante la técnica de evaporación de cañón de electrones. Un haz de electrones incide sobre láminas de hierro y terbio, y a causa del choque arranca átomos metálicos de las dos láminas que se recogen sobre un sustrato. Esta técnica permite preparar láminas muy delgadas de metales y de sus aleaciones. Nuestra lámina de Fe_3Tb, en particular, tiene un espesor de 30 angstroms. Sus propiedades magnéticas se explican dentro del contexto del magnetismo aleatorio, de acuerdo con el cual existe un orden magnético que se extiende a unas decenas de angstroms y provoca la aparición de "islas ferromagnéticas" que se comportan como imanes mesoscópicos.

En el caso de las partículas de la proteína de ferritina, se trata de material natural, que se encuentra en el bazo del caballo. Esta proteína tiene un núcleo magnético que contiene, en promedio, unos 4500 átomos de hierro. Este núcleo es esférico y su radio promedio es de 60 angstroms. En una muestra de ferritina hay una amplia gama de núcleos magnéticos con tamaños diferentes. Los átomos de hierro del núcleo magnético forman una estructura magnética antiferromagnética. En ausencia de campo externo, el momento magnético de los materiales antiferromagnéticos es nulo, las dos redes magnéticas que se forman en estos materiales poseen momentos magnéticos opuestos ($\mathbf{M_1} = -\mathbf{M_2}$). Para caracterizar el orden magnético en estos materiales, se define el vector de Néel, **L**, que es $\mathbf{M_1} - \mathbf{M_2}$. En partículas pequeñas



11. VARIACION DEL MOMENTO MAGNETICO REMANENTE, o magnetización remanente, con el logaritmo del tiempo. La temperatura viene indicada en grados kelvin.

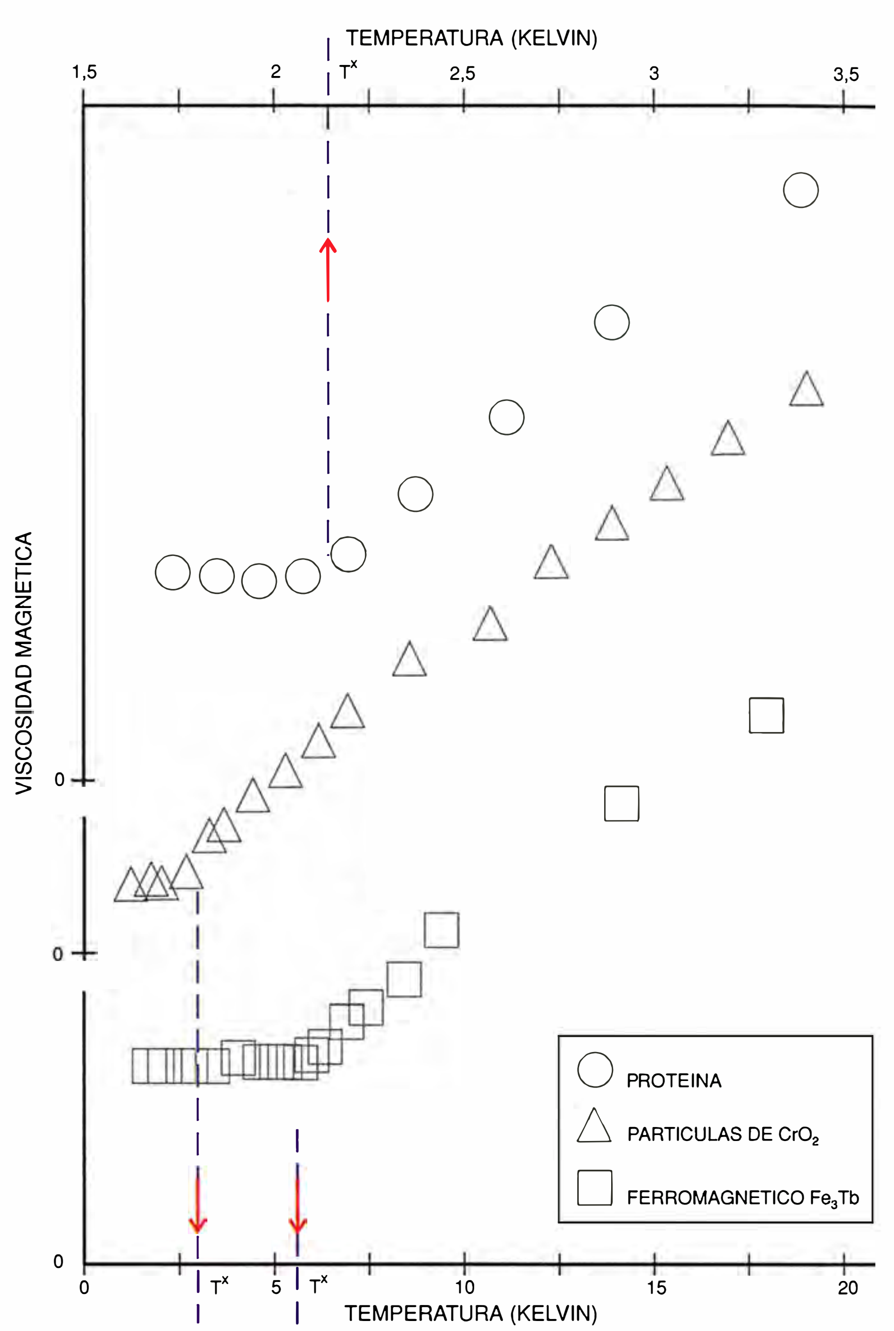
antiferromagnéticas existe un pequeño momento magnético neto y el vector de Néel sigue la misma ley de evolución temporal que dicho momento.

Los experimentos de relajación se hacen según el criterio siguiente: primero, las muestras se enfrían desde temperatura ambiente y en presencia de un campo magnético **H**; una vez alcanzada la temperatura deseada, se cambia el campo al valor **–H** y se mide la evolución del momento magnético remanente. Para los tres materiales estudiados, el momento magnético remanente toma forma de recta. La viscosidad magnética, **S**, es por definición la pendiente de tal recta; la viscosidad depende linealmente de la temperatura, pero por debajo de unos pocos grados kelvin se independiza de ésta.

Conviene profundizar en el significado físico de esos resultados. Al enfriar una de nuestras muestras en el seno de un campo magnético **H**, alineamos muchas de sus unidades magnéticas, partículas (CrO_2), islas ferromagnéticas (Fe_3Tb) y partículas antiferromagnéticas (ferritina) paralelas a dicho campo. Al invertir la dirección del campo magnético, **–H**, algunas unidades invierten inmediatamente el sentido de su momento magnético y el resto lo va haciendo con el paso del tiempo. Estos cambios son los que producen la variación del momento magnético con el tiempo. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será el cambio del momento magnético con el tiempo. Por este motivo, cuando reducimos la temperatura disminuye la pendiente de la recta de la evolución del momento magnético remanente en función del logaritmo del tiempo.

La nivelación de los valores de viscosidad a bajas temperaturas indica que los cambios en la dirección del momento magnético de las unidades magnéticas no dependen de la temperatura, lo que es coherente con la existencia del efecto túnel del momento magnético a través de las barreras energéticas que separan los estados con diferente orientación del momento magnético. Es decir, existen fenómenos que dependen del tiempo, pero no de la temperatura. La transición entre los regímenes clásico y cuántico se produce de manera brusca, de acuerdo con predicciones teóricas que indican que el movimiento de los polos de un imán mesoscópico se produce casi sin disipación energética. Además, la temperatura de la transición es mayor cuanto mayor son las barreras energéticas que el momento magnético atraviesa por efecto túnel, existiendo muy buena correspondencia entre el valor de la anisotropía magnética y la temperatura de transición, tal y como predice la teoría.

En conclusión, pensamos que hoy en día el magnetismo de sistemas mesoscópicos constituye uno de los mejores bancos de prueba para estudiar nuevos fenómenos cuánticos macroscópicos y verificar teorías, a la vez que representa una primera piedra en la idea del computador cuántico. Esperamos que cada vez haya más teóricos y experimentalistas que acepten el reto.



12. VARIACION CON LA TEMPERATURA de la viscosidad magnética. En los tres casos descritos, existe, a unos pocos grados kelvin, una transición nítida entre la dependencia lineal de la viscosidad con la temperatura y su independencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTUM THEORY OF NUCLEATION IN FERROMAGNETS. E. M. Chudnovsky y L. Gunther, en *Physics Review B37*, páginas 9455-9459. American Physical Society, 1988.

QUANTUM RELAXATION IN RANDOM MAGNETS. J. Tejada, X. X. Zhang y E. M. Chudnovsky, en *Physics Review B47*, págs. 14977-14987. American Physical Society, 1993.

NONTHERMAL VISCOSITY IN MAGNETS: QUANTUM TUNNELING OF THE MAGNETIZATION. J. Tejada, X. X. Zhang y Ll. Balcells en *J. Appl. Phys.*, n.º 73, págs. 6709-6714. American Physical Society, 1993.

¿Puede explicarse la conciencia?

John Horgan

El cerebro humano, otrora el máximo misterio biológico, está rindiendo poco a poco sus secretos. Los investigadores sondean sus recovecos más recónditos con instrumentos cada vez más potentes, desde microelectrodos capaces de distinguir los gritos de las neuronas individuales hasta las técnicas de obtención de imágenes por resonancia magnética o por tomografía de emisión positrónica, que pueden ampliar la sinfonía cortical que produce la contemplación de *La Grande Jatte* de Georges Seurat o, por poner otro ejemplo, la percepción del aroma de unas chuletas a la parrilla. Los procesos fisiológicos subyacentes a facetas de la mente como la memoria, la percepción, el aprendizaje y el lenguaje comienzan a comprenderse merced a tales técnicas y a otras parecidas.

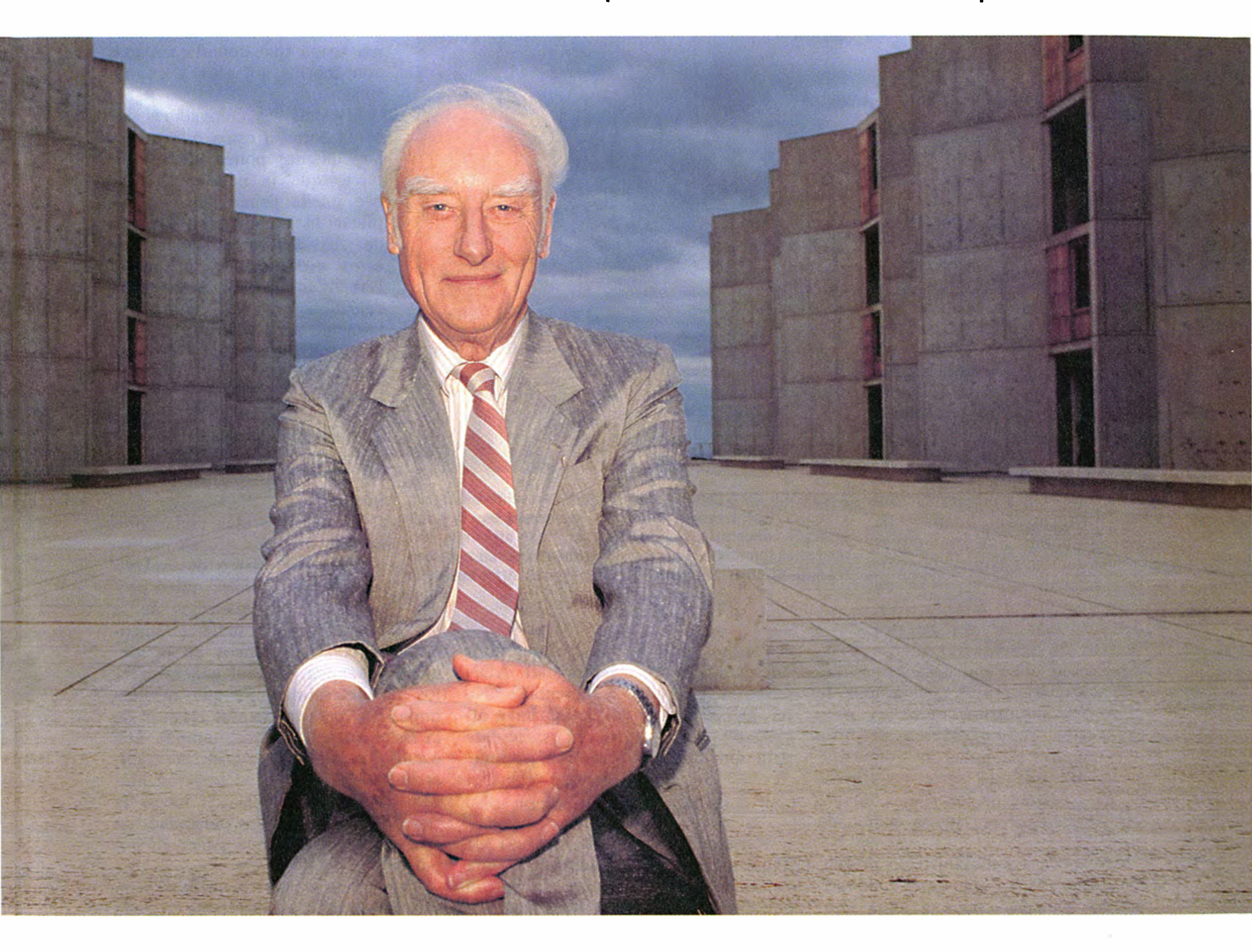
Envalentonados por estos logros, cada vez hay más investigadores que osen ocuparse del fenómeno a un tiempo más esquivo e inevitable de todos, a saber, la conciencia, vale decir, el conocimiento subjetivo e inmediato que tenemos del mundo y de nosotros mismos. El mérito, o la culpa, de esta moda hay que atribuírselo en buena medida a Francis Crick. Crick, que compartió el Premio Nobel por el descubrimiento en 1953 de la estructura del ADN, se dedicó a la neurología al poco de trasladarse de Inglaterra al Instituto Salk de Estudios Biológicos de San Diego, hace casi veinte años. De la misma manera que sólo un tenaz azote de rojos —el fallecido expresidente Nixon— podía restablecer las relaciones diplomáticas entre EE.UU. y China comunista, sólo Crick, muy avezado en las lides de la investigación, podía lograr que la conciencia se convirtiese en materia legítima de estudio científico.

En 1990, él y Christof Koch, joven investigador del Instituto de Tecnología de California e íntimo colaborador suyo, proclamaron en *Seminars in the Neurosciences* que había llegado la hora de abordar el problema de la conciencia, rechazando así la convicción de muchos de sus colegas de que la conciencia no puede ser definida y, menos aún, estudiada. Conciencia, adujeron Crick y Koch, es en realidad sinónimo de conocimiento, y todas las formas de conocimiento —ya se refiera a objetos del mundo exterior o a conceptos internos sumamente abstractos— parecen entrañar un mismo mecanismo subyacente, que combina atención y memoria a corto plazo.

Frente a lo aceptado en las ciencias cognitivas, en filosofía y en otros campos, Crick y Koch mantenían que no podía esperarse una comprensión cabal de la conciencia ni de cualquier otro fenómeno mental si se trata al cerebro como una "caja negra", esto es, como un objeto cuya estructura interna es desconocida y puede que irrelevante. La única forma de que los científicos logren acumular el tipo de saber empírico e inequívoco necesario para la creación de modelos científicos auténticos de la conciencia —análogos a los que explican la transmisión de información genética por medio del ADN— es examinando las neuronas y sus interacciones.

Crick y Koch instan a los investigadores a concentrar sus esfuerzos sobre el conocimiento visual, pues el sistema visual se encuentra ya bien cartografiado en el hombre y en los animales. Si acertaran a descubrir los mecanismos neurológicos subyacentes a esta función tal vez se pudiesen desvelar fenómenos de mayor sutileza y

¿Qué es la conciencia?
¿Puede explicarla la neurobiología o,
por el contrario y como objetan
algunos filósofos, es un fenómeno esquivo
que trasciende la ciencia experimental?



1. FRANCIS CRICK, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, ha espoleado el interés por la conciencia al declararla tema legítimo de estudio científico.

complejidad, como la conciencia de uno mismo, que tal vez sea exclusiva de los humanos (y por consiguiente, mucho más difícil de estudiar a nivel neuronal). Puede incluso que lleguemos a comprender por qué tenemos la paradójica sensación de libre albedrío, esa noción indeleble de que nuestras mentes tienen existencia independiente de nuestros cuerpos y ejercen control sobre ellos. Crick expone y desarrolla estas ideas en *The Astonishing Hypothesis*, libro publicado este mismo año y que ha dedicado a Koch.

Sus exhortaciones han contribuido a provocar una estampida intelectual en la que investigadores de primera línea se codean con filósofos, informáticos, psiquiatras e individuos de tipología manifiestamente exó-



2. COLIN McGINN, filósofo de la Universidad Rutgers y "mistérico" irreductible. Cree que la conciencia y sus arcanos concomitantes, del tipo del libre albedrío, son misterios que los seres humanos nunca llegarán a desentrañar, ni científicamente ni de ninguna otra manera.

tica, sedientos todos por comprender la mente. Las reuniones y congresos proliferan. El pasado abril se juntaron más de 300 investigadores en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Arizona, en una conferencia titulada "Hacia una base científica de la conciencia". La conferencia anual de la Sociedad de Neurociencias, la reunión mayor y de más prestigio de esta disciplina, será anfitriona del primer simposio sobre conciencia cuando celebre su convención el próximo noviembre, en Miami. Han surgido nuevas publicaciones para alimentar este floreciente interés, entre las que se cuenta *Psyche*, un boletín de correo electrónico con base en Australia, y el *Journal of Consciousness Studies*, publicación trimestral británica cuyo lanzamiento está previsto para este verano.

Claro es que dista de haber acuerdo sobre cómo estudiar o definir la conciencia. Hay un distinguido investigador que proclama haber "resuelto" ya el asunto. Se trata de Gerald M. Edelman, del Instituto de Investigación Scripps, cuyas investigaciones sobre anticuerpos le valieron en 1972 un Premio Nobel compartido. Edelman sostiene que nuestro sentido de conciencia emana de un proceso al que denomina "darwinismo neuronal", por el cual grupos de neuronas compiten entre sí para crear una representación efectiva del mundo. Edelman ha impartido su teoría en una serie de libros, el más reciente de los cuales, *Bright Air, Brilliant Fire*, se ha publicado en 1992.

Crick acusa a Edelman de presentar ideas que no son demasiado originales aliñadas con una jerga idiosincrástica y oscura. Son mayoría los neurocientíficos conformes con esta evaluación (y que estiman ridícula la sugerencia, recientemente aparecida en el *New Yorker*, de que Edelman podría recibir un segundo Premio Nobel por este trabajo). Pero incluso quienes admiran los trabajos de Crick sospechan que su planteamiento pudiera ser demasiado restrictivo. Gerald D. Fischbach, de la Universidad de Harvard, que fue presidente de la Sociedad de Neurociencias, opina que no está claro si una teoría del tipo "electrofisiológico" como la evocada por Crick podría ser suficiente para explicar la conciencia en el mismo sentido en que el descubrimiento de la estructura del ADN permitió explicar la herencia. "No me parece que la disciplina haya alcanzado ya la madurez suficiente para dilucidar esta cuestión", opina.

Los nuevos mistéricos

Tomaso Poggio, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, una autoridad en teoría de la percepción que fue director de la tesis doctoral de Koch, opina que Crick tal vez esté haciendo demasiado hincapié en los mecanismos que pudieran coordinar o ligar entre sí las excitaciones de las neuronas que responden a una escena visual, al tiempo que pudiera estar descuidando el papel que podría desempeñar la plasticidad del cerebro (su capacidad para modificar su red de conexiones) en la creación de conciencia o de otras facetas de la mente. Antonio R. Damasio, de la Universidad de Iowa, que "cartografía" nuestras facultades mentales estudiando sujetos que sufren lesiones cerebrales, sostiene que dado que una teoría de la conciencia ha de mostrar cómo adquirimos cada uno de nosotros el sentido de nuestro yo, no sólo habrá de tener en cuenta al cerebro, sino al cuerpo entero. También está convencido de que, puesto que las interacciones de un individuo con su medio y con otras personas moldean la conciencia, es muy probable que un modelo neuronal de la misma tenga que complementarse con teorías sociales y cognitivas.

Mientras sus cultivadores debaten entre sí estos problemas, hay quienes ponen en tela de juicio que la neurociencia al uso pueda jamás llegar a explicar la conciencia, a pesar de sus éxitos al esclarecer otros atributos de la mente. Los miembros de este grupo ecléctico proceden fundamentalmente de tradiciones ajenas al cuerpo principal de la ciencia neurológica, como la física y la filosofía, y suelen parecer menos interesados en aclarar qué es la conciencia que en mistificarla, por lo que no sería inadecuado tildarlos de mistéricos.

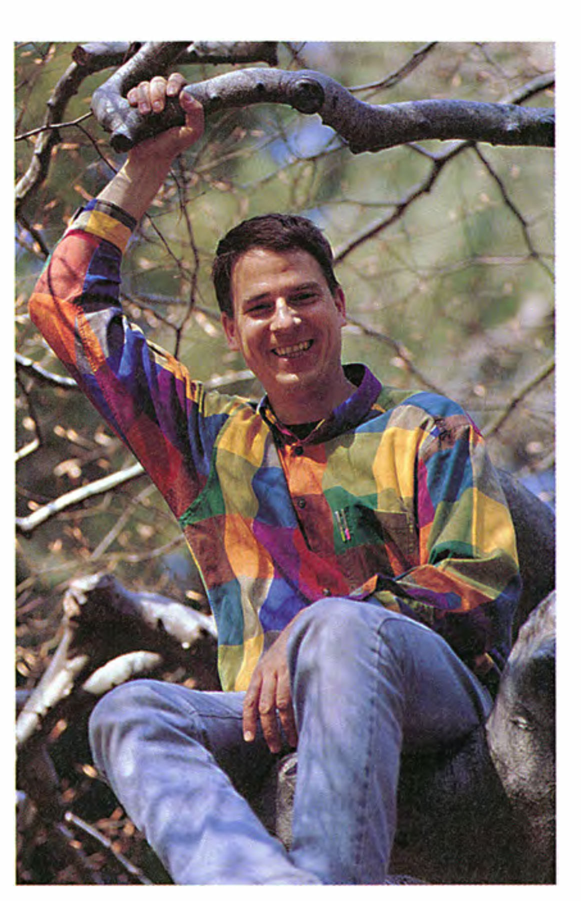
El miembro más esclarecido de uno de estos grupos es Roger Penrose, físico de la Universidad de Oxford, quien propone que los misterios de la mente han de hallarse emparentados con los arcanos de la mecánica cuántica, la cual genera efectos no determinísticos que resultan imposibles para las teorías clásicas de la física (o de la neurobiología). Los estudiosos de las neurociencias tradicionales al principio no hicieron ningún caso de esta idea y luego la ridiculizaron, pero la tenacidad de Penrose la va haciendo ganar en popularidad.

Otro grupo mistérico, integrado en su mayoría por filósofos, pone en duda que ninguna teoría basada en efectos estrictamente materialistas (sean cuánticos o clásicos) pueda explicar verdaderamente cómo y por qué tenemos los seres humanos una experiencia subjetiva del mundo. "La cuestión es cómo puede tener ningún sistema físico un estado consciente", plantea el filósofo Jerry A. Fodor, de la Universidad Rutgers. Quienes consideran que la ciencia puede, por sí sola, responder a esta pregunta es que "en realidad no la comprenden", declara Fodor.

Ninguno de estos filósofos aboga por el dualismo, teoría que sostiene que la mente posee existencia inde-

pendiente y que puede influir en la materia. Pero sí rechazan el materialismo irreductible de Crick, quien en su nuevo libro proclama que "nuestros gozos y nuestras penas, nuestros recuerdos y nuestras ambiciones, nuestro sentido de identidad personal y de libre albedrío, no son en realidad sino la conducta de vastos ensamblajes de neuronas y de sus moléculas asociadas". Semejante marco conceptual, sostienen estos filósofos, es inadecuado para la comprensión de los fenómenos mentales. Hace falta una teoría de otro tipo que haga "transparente" la relación entre mente y materia, en palabras del filósofo Thomas Nagel, de la Universidad de Nueva York.

Tanto estas consideraciones filosóficas como las teorías "cuánticas" de la conciencia son rechazadas por Terrence J. Sejnowski, que investiga redes neuronales en el Instituto Salk. "Yo atribuyo tales argumentos a la ignorancia", dice Sejnowski, que suele tomar té con Crick y aplaude sus esfuerzos por dar rango científico a la conciencia. Sejnowski opina que si los investigadores se atuvieran al estricto programa de Crick, "podrían llegar realmente a algo" en el estudio del más profundo enigma de la biología. Tras recordar que la vida pareció en otro tiempo de una complejidad imposible (antes de que el descubrimiento de la estructura del ADN revelase de qué forma pasa la información de una generación a la siguiente), Sejnowski sostiene que los velos de misterio en que la mente está envuelta se esfumarán en cuanto se haya aprendido más sobre el funcionamiento del cerebro.



3. CHRISTOF KOCH, del Instituto de Tecnología de California y colaborador de Crick, opina que, en lo tocante a la conciencia, los filósofos deberían atenerse al precepto de Ludwig Wittgenstein: "De lo que no se puede hablar, mejor es callarse."

"Lo mismito que en Woodstock"

No obstante, Sejnowski tiene esperanza de que las objeciones formuladas por los filósofos escépticos y la "claque cuántica", aunque desencaminadas, sirvan de acicate a los investigadores para ser más originales y más rigurosos en sus trabajos sobre la conciencia. "También tiene ventajas que las discrepancias sean tan exageradas", opina Sejnowski.

Por este criterio, tuvo que haber oportunidades sin cuento en el reciente congreso sobre conciencia celebrado en la Universidad de Arizona, presentado como "la primera conferencia científica interdisciplinar sobre conciencia." "¡Guay! ¡Lo mismito que en Woodstock!", exclama un orador al pasar la vista sobre un auditorio atiborrado de neurólogos, filósofos, psiquiatras, estudiosos de la cognición y personal de imposible catalogación. Abundan los choques culturales y la reunión ofrece verdaderamente una "instantánea" de un campo —llamémoslo estudios de la conciencia— transido de las congojas de la creación.

No asiste Crick, pero sí Koch. Y también Steen Rasmussen, bioquímico e informático del Instituto Santa Fe, cuartel general de las teorías del caos y de la complejidad, hoy tan de moda. Rasmussen sugiere que la mente pudiera ser un "emergente" (esto es, una propiedad impredecible e irreductible) del complicado comportamiento del cerebro, lo mismo que el *Ulysses* de James Joyce constituye un resultado sorprendente de la aplicación al alfabeto de las reglas ortográficas y gramaticales.

No faltan quienes asumen posiciones más radicales sobre la conciencia. Brian D. Josephson, de la Universidad de Cambridge, ganador en 1973 de un Premio Nobel por el descubrimiento de un sutil efecto cuántico que hoy lleva su nombre, reclama una teoría de campo unificado capaz de explicar incluso las experiencias místicas o del ocultismo. Andrew T. Weil, físico de la Universidad de Arizona y autoridad en psicodelia, sostiene que una teoría completa de la mente ha de dar razón de la supuesta capacidad de los indios sudamericanos de experimentar alucinaciones idénticas por ingestión de drogas psicodélicas.

Cuando uno cree haber trabado relación ya con todos los posibles "paradigmas" (término del que mucho se ha abusado en esta conferencia), aparece uno nuevo. No ha acabado una oradora de describir los pensamientos humanos como "fluctuaciones cuánticas de la energía del vacío del universo" —el cual, asegura a sus oyentes, "es Dios, en realidad"—, cuando uno de los asistentes se pone en pie para proclamar que los físicos están descubriendo profundas concatenaciones entre la información, la termodinámica y los agujeros negros y que estos hallazgos pueden contribuir a desvelar los misterios de la conciencia. "No hay un agujero negro en nuestros cerebros", añade. "¡Pero a mí se me ha hecho uno en el mío!", le corta otro de los asistentes, que ya no aguanta más.

Quienes encuentren demasiado solemnes las disertaciones del auditorio pueden merodear por el zaguán en busca de sendas menos lineales. "Allí es donde está lo verdaderamente interesante", nos confía Spiros Antonopoulos, un periodista que ostenta aro en la nariz y perilla trenzada y que está cubriendo la reunión para una revista "ciberpunk", *Fringeware Review*. Allí podemos sumarnos a discusiones sobre si son los humanos los únicos que poseen conciencia o si los ordenadores, los murciélagos e incluso los paramecios comparten este rasgo.

No faltan en la reunión los descubrimientos empíricos. Entre los más llamativos se cuentan los concernientes a enfermos cuyo sentido de la conciencia ha resultado lesionado por algún trauma o enfermedad. Varios investigadores han estudiado pacientes que manifiestan una extraña condi-



4. LA ACTIVACION CAOTICA de grandes grupos de neuronas puede permitirnos adquirir conciencia de nuevas percepciones o responder rápidamente a ellas, según Walter J. Freeman, de la Universidad de California en Berkeley. Esta imagen es un "retrato de fases" abstracto de la respuesta encefalográfica de la corteza olfativa del cerebro a un aroma.

ción conocida por visión ciega. Responden a estímulos visuales —pueden incluso atrapar una pelota que se les lance— mientras se empeñan en afirmar que no ven nada.

Victor W. Mark, neurólogo de la Universidad de Dakota del Norte, presenta una grabación en vídeo de una paciente que sufre una epilepsia tan grave que para aliviarla se efectuó la escisión quirúrgica de su *corpus callosum*, el haz de neuronas que conecta los dos hemisferios cerebrales. Aunque la operación mejoró su estado en lo referente a los ataques, quedó con dos centros de conciencia que se disputan la dominancia. Al preguntársele si tiene sensibilidad en la mano izquierda, la paciente, contorsionado el rostro, exclama: "¡Sí! ¡Espere! ¡No! ¡Sí! ¡No, no! ¡Espere, sí!", mientras cada una de sus dos mentes, de las cuales sólo una puede sentir la mano, intenta responder. El investigador le entrega entonces una hoja de papel en la que ha escrito las palabras "Sí" y "No" y le pide que señale con el dedo la respuesta correcta. La paciente permanece un momento con la vista clavada en el papel. Después, el índice de la mano izquierda se clava en el "sí" y el de su mano derecha, en el "no".

Para los materialistas como Crick, el significado de estos hechos es evidente. Cuando el cerebro sufre cierta clase de lesiones, la conciencia (y no necesariamente la percepción) queda trastornada. Resulta claro que la conciencia no posee una existencia independiente de lo que se ha dado en llamar "la máquina de carne" sino que está firmemente alojada en su seno. Sin embargo, otros asistentes extraen de la grabación presentada por Mark mensajes distintos, como si de uno de los borrones de un test de Rorschach se tratara. Uno hace notar que incluso los individuos sanos experimentan cierta fractura de su propio yo, aunque en forma mucho menos dramática. Un psiquiatra se pregunta en voz alta si podría entrenarse a los dos egos de la paciente para que se llevasen mejor mediante técnicas de resolución de conflictos.

El problema de la integración

Durante su disertación, Koch se esfuerza por hacer que el debate baje a tierra. Recorriendo incansable la tarima de un lado a otro, enfundado en vaqueros y calzado con estridentes botas camperas de piel de lagarto, lanza a gran velocidad y con acento germánico un resumen del mensaje que Crick y él han promulgado a lo largo de los cuatro últimos años: los científicos deben concentrarse en cuestiones susceptibles de resolución experimental y dejar las especulaciones metafísicas "para tertulias nocturnas ante unas cervezas". En apoyo de su tesis, cita una frase del "filósofo" Clint Eastwood: "Uno tiene que conocer sus limitaciones."

Pasa luego a detallar el razonamiento de Crick y suyo de que la conciencia emana de un proceso en el que se combina la atención con la memoria a corto plazo. (Indica que William James, un filósofo de comienzos de siglo, fue el primero en verlo así.) La atención es un fenómeno que entraña más que la mera elaboración de información. Para demostrarlo presenta una transparencia de una silueta que tanto puede corresponder a un jarrón como a un par de rostros humanos enfrentados de perfil. Aunque el estímulo visual que llega al cerebro es el mismo, la figura percibida, o a la que se presta atención, cambia continuamente. ¿Qué actividad neuronal corresponde al cambio de atención?

La respuesta a esta pregunta se complica porque "no hay un único lugar en el que todo se ensamble" para la formación de una percepción; incluso una escena individual es procesada por diferentes neuronas en diferentes partes del cerebro. Es preciso, por consiguiente, determinar primero qué mecanismo transforma el disparo de neuronas que se encuentran dispersas por toda la corteza visual y suscita una percepción unitaria. "Este problema se conoce como problema de la integración", explica Koch, haciendo notar que muchos investigadores lo consideran el fundamental de su disciplina.

Una posible solución del problema de la integración ha sido sugerida por experimentos con animales, según los cuales hay veces que neuronas situadas en diferentes regiones del cerebro oscilan a la misma frecuencia, de unos 40 ciclos por segundo. Koch pide a sus oyentes que imaginen el cerebro como un árbol de Navidad provisto de miles de millones de lucecitas que destellan en apariencia al azar. Estos destellos representan la respuesta de la corteza visual a la contemplación de, por ejemplo, una sala llena de gente. De pronto, un subconjunto de luces se sincroniza a la misma frecuencia, 40 veces por segundo, mientras la mente enfoca el rostro de un antiguo amor.

Koch admite que las pruebas que hacen intervenir oscilaciones de 40 hercios en la percepción consciente son tenues; donde se han puesto más claramente de manifiesto ha sido en gatos anestesiados. Otra forma de ligadura o integración podría ser la mera sincronía: lo que ocurre en este

caso es que las neuronas se disparan a la vez, pero no necesariamente a la misma frecuencia. También se están obteniendo —con cuentagotas— pruebas de sincronía en experimentos con animales.

Tras la disertación de Koch, Valerie Gray Hardcastle, filósofa del Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia, sube al estrado para proclamar que "las soluciones sencillas al problema de la integración forzosamente han de fracasar". Puesto que la supervisión de neuronas individuales puede originar asociaciones espurias, propone que sería mejor examinar el comportamiento de poblaciones de neuronas e incluso del cerebro entero.

Walter J. Freeman, un profesor alto y barbicano de la Universidad de Berkeley, plantea objeciones similares a las observaciones de Koch. Sus críticas son de peso, pues fue uno de los primeros investigadores que se ocuparon de las oscilaciones de 40 hercios. Freeman asegura que ni la oscilación ni la sincronización podrán desempeñar sino un pequeño papel en la solución del problema de la integración y que "la actual oleada de entusiasmo está fuera de lugar".

Freeman aboga por un ataque más complejo al problema de la integración. Los grupos grandes de neuronas exhiben un comportamiento caótico, según explica; es decir, sus activaciones parecen aleatorias, aunque en realidad contienen un orden oculto. Lo mismo que todos los sistemas caóticos, estas configuraciones neuronales son muy sensibles a influencias diminutas. La visión de un rostro familiar, por consiguiente, puede desencadenar un abrupto desplazamiento de la configuración de excitaciones, que corresponde a un desplazamiento de la propia conciencia. Freeman concede, sin embargo, que incluso su teoría es sólo —y en el mejor de los casos— una pieza del rompecabezas.

También cree que Benjamin Libet puede aportar otra pieza más. Libet, de la Universidad de California en San Francisco, es uno de los pocos investigadores que han estudiado la conciencia mediante una extensa serie de experimentos con humanos. Es hombre de rasgos cincelados cuya expresión —ojos entornados, un tanto a la defensiva— indica que ha tenido que luchar duramente para que su trabajo sea aceptado. (En su último libro, Crick recuerda que una vez Libet le confesó que sólo se atrevió a estudiar la conciencia en sujetos humanos tras haber logrado el nombramiento vitalicio.)

El tiempo lo es todo

En uno de sus grupos de experimentos Libet se sirvió de enfermos en cuyas cortezas cerebrales se habían implantado electrodos por razones médicas. Libet excitaba estos electrodos y la piel de los sujetos con un impulso eléctrico débil. En ambos casos, los sujetos sólo se percataban de los impulsos si duraban más de medio segundo. Si aplicaba el estímulo a las neuronas corticales como hasta medio segundo antes de estimular la piel, los sujetos informaban, paradójicamente, que habían sentido primero los impulsos cutáneos.

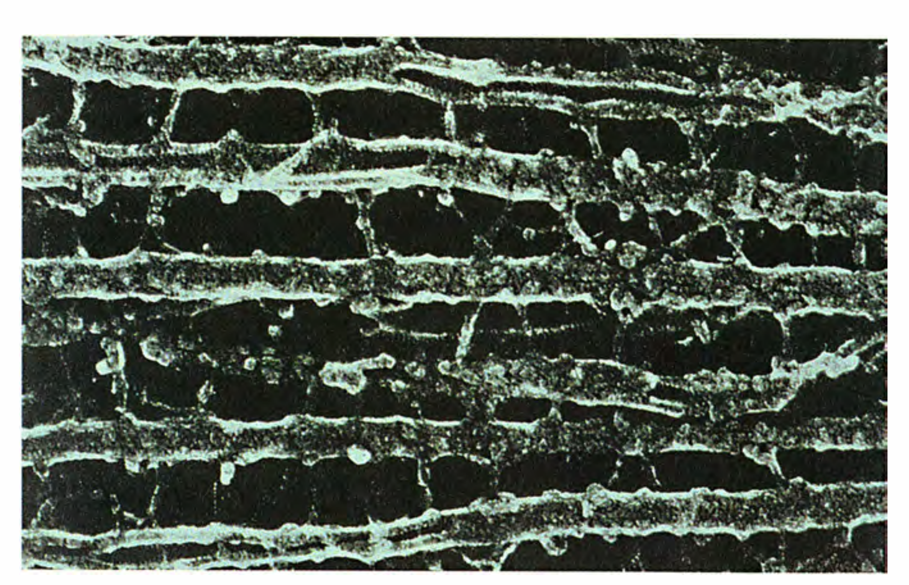
La interpretación de Libet es que cuando los voluntarios se percataban de la estimulación de su piel, experimentaban la sensación como si hubieran tenido conciencia de ella desde el principio y no tras medio segundo. Se produce una compensación subjetiva del retardo en la percepción de las sensaciones táctiles mediante un proceso al que denomina "referencia retrógrada en el tiempo", y asimila esta facultad a la que permite a un observador que pasa junto a una verja mantener una imagen constante de la casa situada por detrás.

El conjunto de experimentos que describe a continuación no es menos sorprendente, a pesar de estar hecho con sujetos sanos, cuyas ondas cerebrales se supervisaban con una máquina electroencefalográfica (EEG). Se les instruyó para que doblaran un dedo en el momento que quisieran, pero fijándose en qué instante tomaban su decisión, según las indicaciones de un reloj. Los voluntarios tardaron alrededor de 0,2 segundos en curvar el dedo tras haber decidido hacerlo. Pero según el EEG, sus cerebros exhibían actividad nerviosa unos 0,3 segundos antes de que decidieran actuar. En cierto sentido, el cerebro había tomado la decisión de mover el dedo antes de que la mente cobrase conciencia de ello. "Y puede incluso que el verdadero inicio de la volición hubiese comenzado antes en alguna otra parte del cerebro que no estábamos supervisando", comenta Libet.

Tras su cuidadosamente preparada intervención, uno de los oyentes le pregunta si sus descubrimientos tienen que ver con el problema del libre albedrío. "Siempre he podido esquivar esa cuestión", replica Libet con una mueca; su idea es que podemos ejercer el libre albedrío no tanto generando propósitos, sino vetándolos, consintiéndolos o respondiendo a ellos de alguna otra forma una vez surgidos.

Hay quienes acusan a Libet de realizar generalizaciones excesivas a partir de sus datos. Flanagan, filósofo de la Universidad de Duke, señala que, estrictamente hablando, sus sujetos no actuaban por su libre voluntad, pues se les había instruido previamente para que curvaran el dedo. También piensa que las demoras temporales descubiertas por Libet puede que sean sólo válidas para respuestas táctiles y no para otros modos sensoriales.

De hecho, Flanagan cree que puede haber muchas modalidades de conciencia. Nuestra conciencia de un aroma, por ejemplo, no solamente



5. LOS MICROTUBULOS, túneles proteínicos diminutos que hacen de esqueleto en casi todas las células (y no sólo en las neuronas), puede que generen efectos cuánticos cruciales para la conciencia, según sostienen Roger Penrose, físico de la Universidad de Oxford, y Stuart R. Hameroff, anestesiólogo de la Universidad de Arizona.

emana de un sistema de neuronas diferente que la de nuestra conciencia visual, sino que es también, en cierto sentido, cualitativamente diferente. Y sostiene que, en consecuencia, los investigadores han de resistir la tentación de buscar mecanismos simples, como las oscilaciones de 40 hercios, la conducta neuronal caótica de Freeman o el factor de retardo temporal de Libet, para explicar la conciencia.

En 1992 Flanagan publicó su libro *Consciousness Reconsidered*, en el que defiende una filosofía a la que denomina naturalismo constructivo, que sostiene que la conciencia es un fenómeno biológico común que no sólo se da en los humanos sino en muchos otros animales y, sin duda, en todos los primates superiores. Entre otros adherentes a esta posición se cuentan Daniel C. Dennett, de la Universidad Tufts (autor de *Consciousness Explained*, también publicado en 1992) y Patricia S. Churchland, de la Universidad de California en San Diego. "Afirmamos que se puede adquirir conocimiento de la conciencia por triangulación", señala Flanagan, es decir, combinando los datos neuronales y psicológicos obtenidos de la experimentación con seres humanos y con animales con la información subjetiva que pueden proporcionar las personas.



6. DAVID J. CHALMERS, de la Universidad de Washington, mantiene que la filosofía debe tender puentes sobre el "vacío explicativo" que separa a una teoría física de la conciencia de nuestra experiencia subjetiva.

Microtúbulos cuánticos

Lo que une a todos estos filósofos con la mayoría de los neurobiólogos es su escepticismo sobre la posibilidad de que la conciencia dependa de efectos cuánticos en algún sentido importante. Por lo menos desde el decenio de 1930 determinados físicos han especulado que la conciencia y la mecánica cuántica pudieran estar relacionadas. Basaban sus conjeturas en el principio de que la acción de medir —que entraña a fin de cuentas un observador consciente— provoca un efecto sobre el resultado de los fenómenos cuánticos. Tales ideas no solían pasar de meros apuntes, pero últimamente han adquirido mayor importancia a causa de Penrose.

Penrose ha adquirido prestigio por su trabajo en relatividad general —en la que es una autoridad— y por la invención de unas figuras geométricas conocidas por "losetas de Penrose", que pueden acoplarse entre sí para formar teselaciones cuasiperiódicas. En un libro suyo de gran venta, titulado *The Emperor's New Mind* (*La nueva mente del emperador*), Penrose atacaba vigorosamente a los proponentes de la inteligencia artificial, que sostienen que los ordenadores pueden reproducir todos los atributos de los humanos, incluida la conciencia. Una segunda parte, *Shadows of Mind*, se publicará este otoño.

Hombre de aspecto travieso, que luce un enmarañado pelo negro, Penrose consigue parecer a la vez distraído y sumamente atento. En su intervención de Tucson expone un resumen de los temas de su nuevo libro. Nos cuenta primero una anécdota sobre Deep Thought ("Pensamiento profundo"), un ordenador que ha derrotado a algunos de los mejores ajedrecistas del mundo, pero que sufrió un revolcón en un final de partida que un aficionado perspicaz hubiera sabido resolver. Penrose concluye que "lo que los ordenadores no pueden hacer es comprender".

La clave del argumento de Penrose es el teorema de Gödel, una pieza matemática construida hace 60 años, que prueba que todo sistema de axiomas moderadamente complejo permite la formulación de enunciados verdaderos cuya veracidad es indemostrable a partir de dichos axiomas. El teorema entraña, según Penrose, que ningún sistema determinístico, ningún sistema que se base en reglas y deducciones (es decir, ni la física clásica, ni la informática, ni la neurobiología) pueden dar cuenta de las facultades creativas de la mente y de su capacidad para discernir la verdad. De hecho, Penrose cree que la mente tiene que valerse de efectos no determinísticos, que sólo cabe describir mediante la mecánica cuántica o "por una nueva teoría que tienda un puente entre las mecánicas clásica y cuántica y que trascienda de la computación". Llega a sugerir incluso que la no localidad, que es la capacidad que tiene una parte de un sistema cuántico para afectar instantáneamente a otras partes del mismo (a la que Einstein tildaba de "misteriosa acción a distancia"), pudiera ser la solución del problema de la integración.

Aunque Penrose era antes bastante inconcreto sobre el lugar donde los efectos cuánticos ejercen su magia, ahora arriesga una conjetura: es en los microtúbulos, diminutos tubos de paredes proteínicas que actúan a modo de esqueleto de las células, incluidas las neuronas. El respaldo de Penrose encanta a Stuart R. Hameroff, el anestesiólogo de la Universidad de Arizona y organizador de la conferencia de Tucson que es el principal proponente de la hipótesis microtubular.

Hameroff, un *hippy* entrado en años que ostenta perilla y cola de caballo, consigue atiborrar su charla con un número impresionante de latiguillos científicos: emergente, fractal, autoorganizativo, dinámico. Pretende haber hallado pruebas de que la pérdida de la conciencia por anestesia está causada por la inhibición del movimiento de los electrones en los microtúbulos.

Hameroff, que erige un impresionante edificio teórico sobre esta frágil hipótesis, propone que los microtúbulos efectúan cómputos no determinísticos, de base cuántica, los cuales, "de alguna forma", hacen surgir la conciencia. Cada neurona deja de ser un simple conmutador, convirtiéndose en "una red dentro de una red". Hameroff reconoce que existen micro-

túbulos no sólo en las neuronas, sino en la mayor parte de las células, pero las consecuencias de ello no le preocupan. "No voy a sostener que los paramecios tengan conciencia, aunque su comportamiento sea francamente inteligente", afirma.

Otros devotos de la "conciencia cuántica" logran hacer de Penrose y Hameroff dechados de rigor. Por ejemplo, Ian N. Marshall, un psiquiatra británico, presenta lo que a su juicio considera es prueba de que el pensamiento emana de efectos cuánticos. Junto con varios colegas afirma que la capacidad de los sujetos para ejecutar tareas sencillas mientras están conectados a un electroencefalógrafo (EEG) depende de que el aparato esté encendido o apagado. ¿Su conclusión? Cuando el equipo EEG está encendido, "observa" al cerebro y consiguientemente perturba sus pensamientos, lo mismo que la observación de un electrón altera su curso. Con otras palabras, el principio de incertidumbre de Heisenberg es aplicable al cerebro entero.

Entre los oyentes consternados por tales afirmaciones se cuenta John G. Taylor, físico del King's College de Londres, especialista en redes neuronales. Taylor insiste en que todos los entusiastas de la "conciencia cuántica", sin excluir a Penrose, ignoran los hechos más elementales de la mecánica cuántica. Por ejemplo, la no localidad y otros efectos cuánticos de los que se han apoderado y a los que han conferido carácter fundamental en el problema de la conciencia, solamente son observables a temperaturas próximas al cero absoluto; muy inferiores, en todo caso, a las del ambiente cerebral. Como casi todos los neurobiólogos, Taylor se opone también al enfoque cuántico por razones prácticas. Antes de recurrir al reduccionismo extremo propugnado por Penrose y demás, los investigadores deberían explorar otras posibilidades más verosímiles, que son experimentalmente accesibles y que ya han demostrado su valor para explicar ciertos aspectos de la percepción y de la memoria. "Si eso fallase, tal vez tendríamos que buscar en otros sitios", añade.

El vacío explicativo

Uno de los pocos puntos de vista ausentes de la reunión de Arizona fue el de Colin McGinn, filósofo de la Universidad Rutgers, quizá el más irreductible de todos los mistéricos. En un libro que publicó en 1991, *The Problem of Consciousness*, McGinn argumentaba que, por ser nuestros cerebros productos de la evolución, tienen limitaciones cognoscitivas. Lo mismo que las ratas o los monos no pueden ni imaginar siquiera la mecánica cuántica, puede que a los humanos nos esté igualmente prohibida la comprensión de ciertos aspectos de la existencia, como la relación entre mente y materia. Con otras palabras, la conciencia, según McGinn, siempre estará fuera del alcance del entendimiento humano.

Al menos uno de los filósofos presentes en la conferencia de Arizona maniobra peligrosamente cerca de esta desalentadora conclusión. David J. Chalmers, un australiano que trabaja en la Universidad de Washington y cuyo parecido con el modelo de Blue Boy, el célebre retrato de Gainsborough, es asombroso, coincide con McGinn en que ninguna teoría estrictamente física puede explicar la conciencia, sin importar que se base en mecanismos cuánticos o neuronales.

Las teorías físicas, cualesquiera que sean, sólo pueden describir *funciones* mentales específicas —como la memoria, la atención, la intención, la introspección— que se corresponden con procesos físicos específicos del cerebro, afirma Chalmers. Pero ninguna de estas teorías toca el verdadero "hueso" que la existencia de la mente plantea: ¿por qué la realización de tales funciones se acompaña de experiencia subjetiva? Después de todo, podemos sin duda imaginar un mundo de androides idénticos a los humanos en todos los aspectos... salvo en que carecen de experiencia consciente del mundo.

La ciencia, por sí sola, no puede dar respuesta a esta pregunta, declara Chalmers. Sin embargo, a diferencia de McGinn, sostiene que los filósofos pueden y deben construir una teoría "de nivel superior" que salve el "hiato explicativo" entre los dominios físico y subjetivo. De hecho, él dispone de tal teoría. Sostiene que al igual que en física se supone la existencia de propiedades de la naturaleza como el espacio, el tiempo, la energía, la carga y la masa, de igual manera una teoría de la conciencia ha de postular la existencia de una nueva propiedad fundamental: la información. El concepto de información, explica, posee aspectos que son a la vez físicos y "fenoménicos" (término filosófico que viene a equivaler a "vivencial" o a "subjetivo").

A Koch tales razonamientos le resultan fastidiosos, pues si todo el mundo compartiera esta creencia de McGinn y de Chalmers, a saber, que la ciencia no puede resolver el problema de la conciencia, la profecía se cumpliría por sí misma. Es posible que la ciencia no sea capaz de aclarar todos los misterios de mi mente, admite Koch, pero las posibilidades de que la filosofía proporcione nociones duraderas sobre la cuestión mente-cuerpo o sobre el problema del libre albedrío son muy escasas, añadiendo que, al considerar tan viejos arcanos, los filósofos deberían atender el consejo de un ilustre predecesor, Ludwig Wittgenstein, según el cual "de lo que no se puede hablar, mejor es callarse".

Mas, de todas las consecuencias resultantes del interés actual por la conciencia, el silencio es la menos verosímil. La misma tarde en que Chalmers pronuncia en Tucson su discurso (que es extraordinariamente bien recibido), Koch se le enfrenta, quejoso de que la "teoría de la información de doble vertiente" expuesta por aquél es imposible de verificar y, por lo tanto, inútil. "¿Por qué no dice usted sin más que cuando uno tiene cerebro, el Espíritu Santo desciende sobre él y le dota de conciencia?", espeta Koch. Porque tal teoría es innecesariamente complicada, replica Chalmers con sequedad, y estaría en desacuerdo con su propia experiencia subjetiva. "¿Pero cómo puedo yo saber si su experiencia subjetiva es la misma que la mía?", farfulla Koch. "¿Cómo puedo saber siquiera si es usted un ser consciente?"

Más tarde, Koch y Chalmers toman juntos el camino al bar del hotel para seguir discutiendo con unas cervezas. Llegan a una especie de reconciliación. Koch expresa interés por las opiniones de Chalmers sobre computación y cognición, el artículo que precisamente lleva Chalmers en su mochila. Y éste, por su parte, concede que tal vez las neurociencias puedan proporcionar alguna dirección e inspiración a la filosofía.

El campo de los estudios sobre la conciencia lucha con su propio problema de ligadura. Pero puede que resulte algún progreso de encuentros como éste, del mismo modo que, por lo que parece, son las interacciones entre neuronas, más que sus propiedades individuales, las que hacen surgir el milagro de la mente.

Y, tras los milenarios e infructuosos intentos de la filosofía y, más recientemente, de la psicología por esclarecer la cuestión, bienvenidas sean las luces que puedan aportar la neurobiología o las ciencias del cómputo.

Ciencia y empresa

Semiconductores

El reto de la miniaturización

Gordon Moore, presidente de Intel, la mayor empresa de semiconductores del mundo, recuerda que la primera planta de fabricación de pastillas ("chips"), construida a finales de los años sesenta, costó 3 millones de dólares. "Hoy día, eso lo vale cualquier pieza del equipamiento de una de nuestras fábricas." El coste presupuestado de las nuevas plantas que Intel y otras empresas están edificando puede superar los 1000 millones de dólares. En el año 2000, esa cifra podría casi decuplicarse.

Se trata de una tendencia capaz, quizá, de acabar con la inexorable bajada del precio unitario de la lógica y la memoria de los ordenadores, que tantos beneficios ha reportado a los fabricantes durante el último cuarto de siglo. Los precios unitarios caían gracias a la capacidad mostrada por las empresas de duplicar la densidad de transistores por pastilla a un ritmo de año y medio.

Consiguientemente, durante los últimos decenios, el coste por función —entendiendo por función un bit de memoria o un conmutador lógico en la pastilla— ha disminuido cada año de un 25 a 30 por ciento. Lo que posibilitaba que los compradores de ordenadores adquiriesen una máquina más potente cada año por el mismo precio.

Tales cambios podrían afectar al crecimiento de la industria de semiconductores. "Existe el temor de que si cambia ese 25 o 30 por ciento de disminución del coste por función, se frene el ritmo de crecimiento de la industria", afirma Glen Cheney, presidente de Semi/Sematech. James D. Meindl, del Instituto de Tecnología de Georgia, lo expresa más sucintamente: "Es un atasco potencial."

El problema estriba en que la vida se hace más difícil para los fabricantes conforme las dimensiones van reduciéndose a tamaños por debajo de un micrometro. En algún momento, avanzado ya el siglo venidero, las técnicas tradicionales de circuitos integrados se agotarán. En torno a los 0,05 micrometros, las dimensiones de los diferentes dispositivos serán tan exiguas, que los efectos cuánticos arruinarán su comportamiento. Habrá que recurrir entonces a nuevas técnicas, fundadas en leyes probabilísticas.

El camino hacia la miniaturización comienza a empinarse, al par que las empresas tratan de exprimir los procesos clásicos de fabricación para mejorarlos. En ellos, finas capas de silicio, óxidos o metal se hacen crecer o se depositan sobre la superficie de una oblea, un disco muy fino de silicio. Se escogen zonas seleccionadas de la superficie, se las conforma y se extraen mediante un proceso fotolitográfico y de grabado al agua-fuerte. Las crestas y valles formados por el grabado se contaminan, o "dopan", con boro o arsénico para controlar la conductividad de las partes componentes de los transistores y otros elementos de los circuitos. Cuando está terminada, la oblea se corta en cuadritos que constituyen pastillas, provistas luego de un recubrimiento de cerámica o plástico.

La fabricación de las micropastillas requiere la iteración de varios pasos (verbigracia, deposición y litografía), antes de que la oblea pueda segmentarse; las pastillas que hoy corren alojan 16 millones de bits de memoria y necesitan 200 pasos de procesado. Tal número se podría triplicar si se llegara a producir pastillas de memoria de acceso aleatorio de 1000 millones de bits hacia el año 2001. Para tales dispositivos, las tolerancias de ingeniería tienen que ser del orden de 15 a 50 nanómetros, inferiores a la anchura de una molécula de ADN arrollada.

Pero los métodos empleados para mejorar la productividad han dado ya de sí casi todo lo que pueden. Con un procesado más limpio se ha conseguido eliminar defectos de la oblea. El rendimiento, medido en obleas libres de defectos, se cifra ahora en un 90 por cien. "Ya no queda dónde ir", dice Thomas Seidel, de Sematech. Otro proceso impulsor de la productividad —ensanchar el diámetro de la oblea para que cada máquina procese más pastillas— ha perdido también parte de su atractivo.

IBM, por ejemplo, fue la primera en idear nuevos procesos y después encargar la maquinaria para fabricar obleas de ocho pulgadas. Sin embargo, incluso IBM podría dudar ante los 2000 millones de dólares o más que serían necesarios para el próximo tamaño de obleas, que podría medir entre 10 y 16 pulgadas de diámetro.

Sematech y Semiconductors Research Corporation han establecido programas para acelerar el paso de la

Se necesitan equipos de grabado de precisión para crear estructuras de micropastillas cuyas dimensiones mínimas son inferiores a un micrometro. Pero los costes de capital se disparan a medida que mengua el tamaño

producción. "Parece haber una regla que ha operado en el pasado, según la cual ninguna máquina puede producir más de 30 obleas por hora", se queja Craig Barrett, de Intel. "No sé si será una ley de la naturaleza o una regla de los vendedores de equipo."

Conforme aumenta la demanda de capital inversor, compartir los riesgos se está convirtiendo en la mejor manera de hacer frente a las dificultades, que ningún fabricante puede asumir por sí solo. Sirva de testigo la colaboración entre IBM, Siemens y Toshiba para el desarrollo de una pastilla de 256 megabits de memoria. Otra vía es la reducción de la capacidad. La industria, que sufrió de un hartazgo de capacidad en los años ochenta, se ha vuelto mucho más enteca. Podría hacerse aún más. "El número de participantes será probablemente muy limitado y los crecientes costes de capital obligan a olvidarse de las expansiones", dice Meindl. Según la empresa VLSI Research, analista de mercados, el número de plantas ha caído, en diez años, de 2000 a 876.

GARY STIX



Test del sida por medio de la saliva elaborado por Epitope. Se introduce un trozo de algodón entre la encía y la mejilla. La muestra de saliva y componentes de la sangre se envían después al laboratorio de análisis clínicos

Sida

Prueba doméstica

El sida, azote del siglo XX, es, en la economía de mercado, un campo prometedor para los laboratorios y fabricantes de equipos médicos. Pero es también un campo de minas. De acuerdo con la investigación realizada por el centro de estudios sobre prevención del sida adscrito a la Universidad de California en San Francisco, habría, en Norteamérica sólo, más de 40 millones de personas que podrían someterse a pruebas sobre infección por virus de inmunodeficiencia humana (VIH) si se les garantizase el secreto del test. La prueba podría añadir otros 100.000 portadores a la lista de sidosos censados. Ante esos datos, hay que ver la necesidad de idear una prueba de VIH en casa, lo que podría suponer un mercado de miles de millones de pesetas.

La empresa Direct Access Diagnosis, subsidiaria de Johnson & Johnson, ha elevado ya a la Administración de Alimentos y Fármacos (FDA) una solicitud para la aprobación de un test que permitiría a cualquiera pincharse un dedo con una lanceta, en casa. El individuo deposita la gota de sangre en un papel de filtro y lo envía al fabricante. Este analiza la muestra según el protocolo habitual de los tests de anticuerpos.

El interesado, que responde a un número clave, obtiene los resultados de la prueba anónima llamando al servicio suministrador. Si la prueba demuestra que la persona es seropositiva, contestará un especialista. De los resultados negativos se informará mediante un mensaje grabado. El comunicante que reciba buenas noticias podrá, no obstante, entrevistarse con un experto y acceder a información suficiente en torno a cuestiones relacionadas con el sida.

Sobre el producto de Direct Access comienza a llover fuego graneado. Para ciertos profesionales clínicos vinculados con el tratamiento, no basta con la llamada telefónica. Critican también la prueba grupos de militancia homosexual, como la NALGHC, alianza dedicada a la asistencia médica de varones homosexuales y lesbianas. Christopher J. Portelli, coordinador de la NALGHC, señaló que los pacientes necesitan, como nadie, el consejo personal sobre las precauciones y prácticas sanitarias para impedir la infección de otros. "Es muy fácil colgar el teléfono cuando recibimos malas noticias", reconoce. Los portadores del virus que carecen del debido asesoramiento se abaten hasta el suicidio o crean una atmósfera de violencia doméstica. Para Portelli, el equipo de test que puede comprarse en la farmacia de la esquina constituiría una tentación muy fuerte para policías y directores de internados.

La Asociación Médica Americana (AMA) se muestra reacia a la recogida doméstica de muestras de sangre. "Todas las pruebas deberían hacerse en un contexto adecuado: cánulas, explicación y examen físico del sujeto." Así lo advierte Raymond Scalettar, directivo de dicha institución. "No estamos ante una prueba rutinaria más, como para hacerla en casa. Para algunos, un resultado positivo constituye una sentencia de muerte."

Elliott J. Millenson, presidente de Direct Access, sale al paso y hace memoria de los siete años de trabajo consagrados al estudio de los problemas planteados por Portelli y Scalettar, y otros de parejo tenor. En esa línea, Millenson ha elaborado un programa muy completo de formación de los consultores por teléfono. Ha creado también una extensa base de datos que usa la información oficial de los centros de control de enfermedades contagiosas con el fin de poner al alcance del cliente todo lo que le conviene saber sobre atención médica, ayuda legal y asesoría económica.

Partidario del test doméstico, cita un estudio de la administración sanitaria, correspondiente a 1991, donde se reconocía que el 8 por ciento de los norteamericanos adultos se proponían someterse a una prueba de VIH durante el año siguiente; esa cifra, dice, se podría haber triplicado de contar con una prueba en casa.

Millenson no se encuentra solo en su discrepancia de la postura de la NALGHC. Asociaciones defensoras

de los derechos de las minorías, investigadores y funcionarios han escrito a la FDA en apoyo del producto y el servicio. Pero ese organismo oficial no ve claro un tema cargado de connotaciones políticas, y ha recabado ayuda de otras instancias superiores de la administración.

Mientras debaten la cuestión, ésta va tornándose más espinosa. Hay ya varias empresas que laboran por convertir el test del sida en algo tan fácil como escupir en un vaso. Saliva Diagnostic Systems (SDS), de Vancouver, está desarrollando un test que algunos equiparan a la prueba doméstica del embarazo: se pone una tira recubierta de un antígeno proteico en contacto con la saliva, cinta que cambia de color a los pocos minutos si existen anticuerpos de VIH.

La FDA camina despacio y no da puntada sin hilo. En 1991 retiró ya del mercado OraSure, un colector oral de muestras de VIH desarrollado por la empresa Epitope. En dicho test, se introduce mediante una cánula un trozo de algodón entre la encía y la mejilla para recoger saliva y componentes de la sangre que se filtran a través del tejido epitelial. En el laboratorio se analiza luego la muestra por si contiene anticuerpos. Epitope había vendido su producto a compañías de seguros que las empleaban para valorar la oportunidad de aceptar o rechazar solicitudes de nuevas pólizas. Pero espera que se le conceda permiso para difundir el OraSure entre los profesionales de la salud.

Ante el paso cauteloso de la FDA, la empresa SDS y otras dos más que han desarrollado pruebas de saliva se han adentrado en naciones subdesarrolladas de Africa y Asia. Si se revela eficaz, el test de la saliva podría emplearse para descubrir la infección por VIH en lugares donde escaseen las instalaciones clínicas. Hay menos anticuerpos en la saliva que en la sangre. Si se refina la sensibilidad del método, podría ser un buen elemento de diagnóstico, opina Thomas C. Quinn, del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas. "La prueba de la saliva puede ser una técnica no invasora muy oportuna", comenta Quinn. La empresa Trinity Biotech, de Dublín, está suministrando su prueba rápida de saliva al gobierno de China. Judy Phelan, directora del producto, dice que los chinos están interesados en evaluar el ensayo para hacer una criba masiva de las personas que entran en el país.

GARY STIX

Mercado libre

En los países del Este europeo

Cuando los nuevos dirigentes llegaron al poder en Europa oriental y en los estados de la antigua Unión Soviética, recibieron una herencia ruinosa: decenas de miles de negocios, desde tiendas hasta siderúrgicas que abarcaban ciudades enteras. La planificación central y el control gubernamental de esas miríadas de empresas habían conducido al desastre económico que barrió del poder a los gobiernos comunistas.

Pero resulta que la transferencia de esas propiedades del estado a manos privadas crea no menos dolores de cabeza que su anterior dirección. "No hay solución mágica: un soplo de ilusionista, un toque de varita mágica y ¡zás! la compañía ya está en manos privadas", se lamenta Anthony A. Repa, asesor económico del gobierno polaco.

Fáciles de exponer, son de ardua resolución los problemas que entraña el privatizar las empresas. La mayoría de los ciudadanos carece de dinero para invertir en acciones y muchas empresas se hallan en tan precaria situación financiera que muy pocos se arriesgarían a comprarlas. Los propios negocios solventes vienen recargados con activos sobreañadidos —complejos de apartamentos y estadios deportivos— que hacen difícil su valoración.

Cada país ha seguido su rumbo particular a la hora de abrazar el mercado libre. En la antigua Alemania oriental, una oficina federal dirige los negocios y las propiedades, mientras trata de organizar su venta o su devolución a los propietarios originales. En Rusia y en las repúblicas checa y eslovaca, por el contrario, los ciudadanos han recibido cupones para comprar acciones de las empresas estatales. En Polonia, la privatización ha seguido diversas estrategias; entre ellas, la inversión extranjera y la creación de fondos de inversión (que actúan de apoderados de los ciudadanos propietarios de cupones). Para los pequeños negocios, la mayoría de las naciones han optado por venderlos a sus directivos o subastarlos.

El método de los cupones goza del favor público porque evita los problemas que surgen cuando se vende al contado la propiedad estatal.. Nemat Shafik, del Departamento de Europa Central del Banco Mundial, enumera dichas dificultades en un reciente informe sobre la experiencia checa: los extranjeros pueden hacer ofertas más elevadas que los nacionales; el número reducido de personas con dinero pueden adquirir la parte del león de las antiguas propiedades públicas, y el bajo precio de las empresas debido a la falta de capital distorsiona las futuras condiciones de mercado. Pero los cupones no son la panacea. A diferencia de la venta con dinero contante y sonante, no generan ingresos para el gobierno ni capital para la modernización de la empresa.

Además, si no se toman precauciones especiales, la privatización mediante cupones puede diseminar la propiedad hasta el punto de impedir una gestión eficaz de la misma. Rusia ha obviado parte de ese riesgo reservando un porcentaje de acciones en cada empresa para directivos y trabajadores. Los checos y los eslovacos adoptaron otra política. Fomentaron la creación de fondos mutuos a los que los ciudadanos se suscribían mediante cupones. En teoría, los fondos pueden mantener un control más ceñido de la compañía que el accionista particular.

En Polonia, esta forma de privatización, cuando entre en funcionamiento, será algo más complicada. Los cupones sólo permiten comprar acciones en fondos de inversión; con los fondos, a su vez, se pueden comprar empresas y dirigirlas. Los precios de las acciones suben y bajan de acuerdo con la valoración que el mercado haga de las compañías en las que invierte, proporcionando así incentivos para una vigilancia atenta. Sólo unas 450 empresas polacas, de un total de 9000, serán objeto de absoluta privatización, indica Repa. A otras las están maquillando para su venta al extranjero o las han adquirido sus directivos en condiciones de ventajista.

Aunque tales manipulaciones de la estructura del mercado pueden ayudar a proporcionar un control efectivo de las compañías y conceder al público acceso al sueño capitalista de propiedad compartida, no atacan necesariamente los problemas de reestructuración real necesaria para sobrevivir. Casi todos esos negocios están faltos de capital para nuevas inversiones, y sobre muchos pesa el gravamen de las deudas que acumularon en los viejos días de la planificación central.

Las firmas incapaces de sobrevivir en su situación actual pueden verse sometidas a lo que se llama liberación de activos (en Wall Street se conoce como "violación, saqueo y

pillaje”). Durante ese proceso, los auditores apartan las propiedades o los negocios que podrían explotar por sí mismos a un buen precio y descartan el resto. Se justifica esa conducta por el principio económico de que resulta mucho más barato cerrar una fábrica y pagar el paro durante dos o tres años que subvencionar una industria deficitaria.

La liberación de activos, sin embargo, no se halla exenta de complicaciones. La interrelación enmarañada de gobierno y empresa sembró de municipios empresariales a Europa oriental y la antigua Unión Soviética. Hay ciudades donde una compañía eléctrica posee no sólo generadores y refinerías de petróleo, sino también las viviendas de los empleados, guarderías y casinos. Algunos de esos aditamentos pueden venderse con beneficios; otros deberán ser absorbidos por el ayuntamiento o el estado, si se quiere que la compañía en cuestión pueda venderse con expectativa de beneficios.

Por paradójico que parezca, las secuelas de la liberalización política que marcó las fases iniciales de la transición a la economía de mercado en esos países podrían estar entorpeciendo las últimas fases de la privatización. En sus años finales, las autoridades centrales cedieron la propiedad de muchas empresas a los gobiernos provinciales o municipales. Los pueblos y ciudades andan todavía más escasos de recursos que los gobiernos nacionales, y se resisten a cargar con el peso de cierres que, a largo plazo, beneficiarían a la economía en su conjunto.

Hay, no obstante, un ejemplo de acertada transición económica que discurre con independencia de los esfuerzos encabezados por el estado. En Polonia, el sector privado ha experimentado rápidos progresos, contribuyendo casi con el 50 por ciento al producto nacional bruto el año pasado. “Polonia se ha convertido en el tigre económico de la región”, observa Repa. “El crecimiento del sector privado ha sido espontáneo. No nació de la privatización, sino de un par de millones de nuevos negocios.” Se espolea el sector privado ante la persistente ineficacia de los vestigios del sector regido por el estado: “En un mercado competitivo, les da ventaja.” Queda por ver si los celosos apparatchiks, despojados de sus chaquets, permitirán que la ventaja no se ahogue.

PAUL WALLICH
Y MARGUERITE HOLLOWAY

Guerras de cucarachas

Nuevas armas

Hasta 50.000 cucarachas pueden considerar nuestro hogar como el suyo propio. Puede llegarse al caso límite de ellas o nosotros. La cùcaracha alemana (*Blatella germanica*), sin ir más lejos, difunde microorganismos nocivos, la salmonella por ejemplo. Las secreciones de las cucarachas pueden producir alergias dermatológicas o respiratorias. Algún que otro investigador se ha visto obligado a dejar ese campo de investigación por culpa de las reacciones alérgicas. Y los estudios epidemiológicos han comprobado que la sensibilidad ante esos insectos constituye un importante factor en los ataques de asma.

Algún pacato ecologista al uso verá ribetes de crueldad en las armas biológicas que los fabricantes se aprestan a poner en manos del usuario. Pero la población seguirá pagando miles de millones de pesetas al año por deshacerse de tan incómodos huéspedes.

EcoScience, una compañía de Worcester, Massachusetts, acaba de lanzar al mercado un tipo de hongo que devora literalmente a la cucaracha alemana. *Metarhizium anisopliae*, tal es su nombre, podría representar el papel de protagonista en una película de terror. Cuando las esporas del hongo entran en contacto con el exoesqueleto de la cucaracha, liberan enzimas que se comen la dura cutícula, permitiendo la entrada de hifas radiculiformes. El hongo se adentra en la entrañas del ortóptero hasta consumirlo en menos de una semana. Durante ese tiempo, las esporas se adhieren también a las compañeras de nido, que encuentran idéntico final.

Afirma EcoScience que su producto es, obvia por redundante, una alternativa ecológica frente a los pulverizadores químicos y a los cebos que atacan el sistema nervioso de las cucarachas. Además, los estudios de la compañía han mostrado que el riesgo de alergias a los hongos es bajo, según Kevin J. Devine, directivo de la empresa.

Según parece, el hongo se empleó ya en la lucha contra las plagas agrícolas en la Rusia zarista. EcoScience ha avanzado en su presentación y los ofrece empaquetados en los anaqueles de los supermercados. Una bolsa de plástico permeable encierra las cámaras cilíndricas de plástico que alojan las esporas de los hongos. La bolsa controla la humedad, así como los niveles de dióxido de carbono y oxígeno. Esta disposición mantiene vivo a *Metarhizium*.

Se está fraguando otro asalto biológico contra la cucaracha. Biosys, empresa de Palo Alto, ha reclutado nematodos. Estos vermes diminutos penetran por el ano de la cucaracha o por su espiráculo (la abertura a través de la cual respira el insecto) y depositan allí una bacteria que la mata y la convierte en festín del nematodo.

Antes, sin embargo, la empresa debe resolver un problema: retardar el metabolismo del nematodo, para que éste no se muera de hambre mientras aguarda su aplicación. “El producto no podría subsistir sin refrigeración en un supermercado”, dice Stephen A. Manweiler, investigador contratado por la empresa.

Otras compañías ensayan con preparaciones que inhiben la síntesis de la quitina, principal componente del duro exoesqueleto del insecto. La Universidad estatal de Carolina del Norte ha iniciado un proyecto para sintetizar la feromona de agregación, que la cucaracha alemana suelta para convocar una reunión de machos y hembras. (Una feromona sexual, por el contrario, atraería sólo al sexo opuesto.) La feromona de agregación podría emplearse para atraer a los insectos a las trampas pegajosas.

S. C. Johnson Co., fabricante de insecticidas, cría unas 8000 cucarachas por semana y estabula hasta un millón de ellas en cualquier época. Para calibrar la eficacia de sus productos utiliza las especies más resistentes. Las cucarachas son enemigos duros de pelar.

GARY STIX



Ciudad de las cucarachas ideada por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura americano, que permite a los investigadores criarlas por miles en espacios cerrados

Juegos de ordenador

Jean-Paul Delahaye

Procedimientos elementales y generales que ejercen efectos mágicos sobre los cálculos numéricos

Sabido es que la sucesión de cifras decimales de π no termina jamás. En efecto, si π fuese exactamente igual a, por ejemplo, 3,14159, estaría dado por la fracción 314159/100000. Ahora bien, tal cosa es imposible, pues en 1871 el matemático Johann Lambert demostró que el número π, lo mismo que el número $\sqrt{2}$, no es cociente de dos enteros. Se dice por ello que π es irracional. Π es, además, trascendente (no es solución de ninguna ecuación polinómica de coeficientes enteros) como demostró Carl Lindemann en 1882, lo cual implica, en particular, que el problema bimilenario de la cuadratura del círculo carece de solución. La construcción con regla y compás de un cuadrado que tenga la misma área que un círculo de radio 1 equivale a la determinación de π mediante intersecciones de rectas y circunferencias, cosa imposible, pues tales intersecciones se traducen en sistemas de ecuaciones de segundo grado como máximo, cuyas soluciones no desembocan jamás en números trascendentes.

La irracionalidad de π significa en la práctica que, al pretender calcularlo, será forzoso contentarse con aproximaciones numéricas. Desde la antigüedad se conocen métodos que proporcionan valores de π cada vez más precisos al llevar más lejos los cálculos.

Gracias a G. Leibniz (1646-1716), matemático alemán que inventó el cálculo diferencial al mismo tiempo que Newton, sabemos que la sucesión de números:

$$x_0 = 4,\ x_1 = 4(1 - 1/3);$$

$$x_2 = 4(1 - 1/3 + 1/5);$$

$$x_3 = 4(1 - 1/3 + 1/5 - 1/7)\ldots \text{ etc.,}$$

proporciona una secuencia de valores que se aproximan alternativamente por exceso y por defecto a π; valores que son bastante aceptables si se llega suficientemente lejos. Veamos algunos términos de esta sucesión:

$$x_0 = 4;$$

$$x_1 = 2{,}666\ldots;$$

$$x_2 = 3{,}4666\ldots;$$

$$\ldots;$$

$$x_{10} = 3{,}232381\ldots;$$

$$x_{50} = 3{,}1611\ldots;$$

$$x_{500} = 3{,}14358\ldots$$

Tanto en matemática pura como en las matemáticas aplicadas existen otros muchos problemas imposibles de tratar de forma exacta, en los que el cálculo de soluciones únicamente puede efectuarse mediante aproximaciones sucesivas, como en el caso que acabamos de ver.

¡Vamos, deprisa!

En lugar de la sucesión propuesta por Leibniz para el cálculo de π podemos utilizar otra descubierta por el matemático indio Ramanujan (1887-1920), indicada en la figura 1 (*véase* "Ramanujan y el número pi", por J. M. Borwein y P. B. Borwein, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1988). Podemos observar que los términos de esta sucesión, aunque son mucho más difíciles de calcular, merecen el esfuerzo. En efecto:

$$x_0 = 3{,}1415927300\ldots;$$

$$x_1 = 3{,}141592653590\ldots,$$

valor que es claramente mejor que el x_{500} de la sucesión precedente. Se dice que esta segunda sucesión converge más rápidamente que la primera. Como es obvio, los métodos de convergencia rápida son preferibles a los de convergencia lenta.

Por consiguiente, un problema fundamental que han de resolver los inventores de algoritmos numéricos es el estudio de la rapidez de convergencia. Un algoritmo muy bueno en teoría puede resultar inutilizable en la práctica si sólo proporciona sucesiones de convergencia lenta. Los matemáticos interesados en conocer un gran número de decimales de π se esfuerzan ante todo por hallar métodos que converjan rápidamente, y los progresos realizados en el cálculo de π (¿para satisfacer quizá las exigencias de la secta de los pi-devotos?) se deben más al descubrimiento de nuevas fórmulas de cálculo que a los avances de la técnica informática. Por otra parte, en el caso de π, además de los progresos logrados gracias a las fórmulas utilizadas y a la tecnología, ha desempeñado un papel importante el descubrimiento de métodos sagaces y económicos para efectuar multiplicaciones de enteros muy largos. Se conocen hoy más de dos millones de cifras decimales de π (récord alcanzado por David y Gregory Chudnovsky en 1990). A título de curiosidad informática y matemática, la figura 2 contiene un programa muy corto en lenguaje C (y su transcripción a Basic) que calcula 2400 decimales de π, o sea, muchos más de los conseguidos nunca en un cálculo a mano.

Se ha realizado una considerable cantidad de trabajo matemático para experimentar y demostrar la convergencia rápida de los métodos numéricos (pues obviamente hay otros números además de π). Es una tarea sin fin, pues en cada problema particular hay métodos que convergen rápidamente y otros que lo hacen con lentitud, y con frecuencia es necesario estudiarlos mucho para saber cuáles son rápidos y cuáles, lentos. A veces, a lo más que se llega es a comprobar que un método es rápido o es lento.

Existe, no obstante, una técnica general que toma una sucesión lentamente convergente y la convierte (al menos en los casos favorables) en otra que converge más rápida-

JEAN-PAUL DELAHAYE es profesor de informática de la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, e investigador del Laboratorio de Informática Fundamental del CNRS en Lille.

mente. Esta técnica, la aceleración de la convergencia, es mágica: con mucha frecuencia bastan unos pocos cálculos elementales para ganar varias cifras decimales, y proporcionan una vía para obtener a menor costo una precisión inesperada.

La delta-2 de Aitken

Veamos un ejemplo. El procedimiento delta-2 de Aitken, inventado en 1926 por el matemático Alexander Aitken (que fue también calculista prodigioso), consiste en aplicar a la sucesión x_n que se quiere acelerar la fórmula siguiente:

$$t_n = (x_n x_{n-2} - x_{n-1}^2)/(x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2})$$

Esta fórmula permite construir una nueva sucesión t_n a partir de una sucesión x_n dada. Con el ejemplo de la sucesión de Leibniz (cuya convergencia es particularmente lenta) se obtiene:

$$t_2 = 3{,}1666...;$$

$$t_{10} = 3{,}1418396...;$$

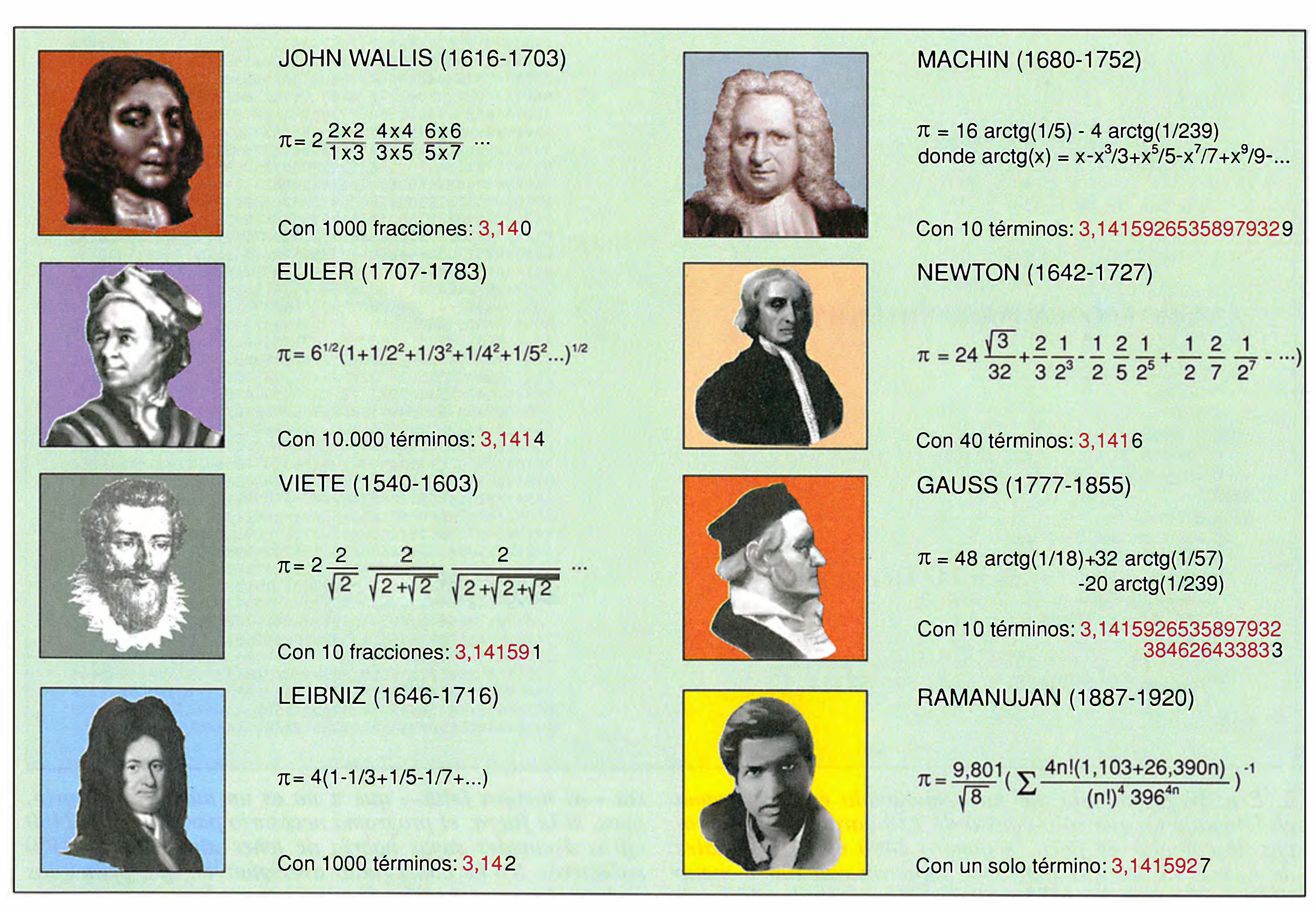
$$t_{50} = 3{,}14159265559...$$

La convergencia es ahora bastante rápida y la nueva sucesión es tan práctica como la de Ramanujan, pues sus términos son mucho más sencillos de calcular. A pesar de no ser la sucesión hoy utilizada para calcular π, vale la pena señalar que la hemos obtenido sin gran esfuerzo y, sobre todo, que la transformación de Aitken es utilizable en muchos más problemas que en los del cálculo de π.

En el caso de la sucesión de Leibniz se puede demostrar que el error cometido al tomar t_n es en cierto momento diez veces menor que el cometido al tomar x_n; más adelante es cien veces menor, luego mil veces menor, etc. Dicho de otro modo, la cantidad $(\pi - t_n)/(\pi - x_n)$ tiende a cero cuando n tiende a infinito, que es exactamente la definición que se adopta para precisar el significado de la expresión "la sucesión t_n acelera la convergencia de la sucesión x_n".

El procedimiento delta-2 de Aitken se inspira en una idea elemental, característica de los métodos de aceleración: "da por supuesto" que la sucesión x_n propuesta es una sucesión geométrica, vale decir, que es de la forma $L + a.b^n$ (si $|b| < 1$, las sucesiones de este tipo convergen hacia L, porque b^n se hace cada vez más pequeño al aumentar n) y trata, partiendo de esa hipótesis, de calcular el límite L (*véase la figura 3*). Si la sucesión a acelerar es verdaderamente una sucesión geométrica, el procedimiento delta-2 calcula directamente el límite en cuanto se dispone de tres términos. Sólo en casos excepcionales se tiene éxito tan rápidamente, pero si la sucesión dada es lo suficientemente parecida a una geométrica, el método acelera la convergencia, como en el caso de la sucesión de Leibniz. El principio heurístico general es, por consiguiente: "Trátese de adivinar el límite a partir de una hipótesis de regularidad de la sucesión; si eso no funciona, tal vez permitirá acelerar la convergencia."

Es una idea muy sencilla que funciona de manera asombrosa, pues no es raro que una sucesión numérica se parezca bastante a una sucesión geométrica. Ahora bien, ¿qué quiere decir "bastante"? Uno de los resultados conocidos sobre el método delta-2 indica que si los cocientes de dos diferencias consecutivas de



1. Para el cálculo de constantes matemáticas pueden utilizarse diversas fórmulas, que originan sucesiones numéricas de convergencia más o menos rápida

dos términos consecutivos de la sucesión x_n convergen a un límite no nulo b, comprendido entre -1 y $+1$, la sucesión obtenida por el procedimiento delta-2 de Aitken acelera la convergencia (en el sentido antes indicado). En pocas palabras: si la sucesión x_n es convergente a L y la sucesión $(x_{n+2}-x_{n+1})/(x_{n+1}-x_n)$ converge a $b \neq 0$, $-1 \leq b < 1$ (situación que se describe diciendo que la convergencia es lineal), entonces $(L-t_n)/(L-x_n)$ tiende a cero. La sucesión de Leibniz tiene efectivamente convergencia lineal; era de esperar, pues, que fuera acelerada por la delta-2 de Aitken.

Se han demostrado otras muchas propiedades de esta sencilla fórmula y, en particular, se ha probado que el procedimiento delta-2 de Aitken es óptimo, en un sentido bien definido, para la aceleración de las sucesiones que tienen convergencia lineal.

Generalización del método de Aitken

Existen, desde luego, numerosas generalizaciones y variantes del método de aceleración de Aitken. El matemático francés Claude Brezinski, que es el más conocido especialista en estas técnicas, ha inventado una gran variedad de ellas, que ha estudiado y utilizado en numerosas aplicaciones.

Estas generalizaciones tienen nombres curiosos, como algoritmo épsilon (debido a P. Wynn), algoritmo rho, algoritmo E, etc. Aceleran las sucesiones de números, o de vectores, o de matrices, etc., y puede demostrarse que ciertos algoritmos clásicos (por ejemplo, el cálculo de valores propios de una matriz) resultan sistemáticamente mejorados al utilizarlos. Es frecuente que las ideas en que se basan estos métodos de aceleración consistan, como en el procedimiento delta-2 de Aitken, en efectuar el cálculo como si fuéramos a adivinar el límite de una sucesión perteneciente a una determinada categoría de sucesiones; es de esperar que, aunque no sea así, el cálculo se aproximará también al límite buscado.

Hay una generalización sencilla del delta-2 de Aitken que recibe el

UN PROGRAMA QUE CALCULA 2400 CIFRAS DE π

PROGRAMA EN LENGUAJE C

```
long int a = 10000,
         b,
         c = 8400,
         d,
         e,
         f[8401],
         g;
main()
{
   for (; b - c;)
         f[b++] = a / 5;
   for ( ;
           d = 0, g = c * 2;
           c -= 14, printf("%.4d", e + d / a), e = d % a)
         for ( b = c;
                 d += f[b] * a, f[b] = d % --g, d /= g--, --b;
                 d *= b)
              ;
}
```

EL MISMO PROGRAMA ESCRITO EN BASIC

```
DEFLNG a-g
DIM f(9801) AS LONG
a = 10000
c = 9800
WHILE (b<>c)
   f(b) = a/5
   b = b + 1
WEND
WHILE (c>0)
   g = 2 * c: d = 0: b = c
   WHILE (b>0)
      d = d + f(b) * a: g = g - 1: f(b) = d MOD g
      d = d/g: g = g - 1: b = b - 1
      IF (b<>0) THEN d = d * b
   WEND
   c = c - 14: x$ = STR$(e + d / a): L = LEN(x$)
   PRINT LEFT$("0000", 5 - L); RIGHT$(x$, L - 1);
   e = d MOD a
WEND
```

RESULTADO DE LA EJECUCION DEL PROGRAMA

```
31415926535897932384626433832795028841971693993751
05820974944592307816406286208998628034825342117067
98214808651328230664709384460955058223172535940812
84811174502841027019385211055596446229489549303819
64428810975665933446128475648233786783165271201909
14564856692346034861045432664821339360726024914127
37245870066063155881748815209209628292540917153643
67892590360011330530548820466521384146951941511609
43305727036575959195309218611738193261179310511854
80744623799627495673518857527248912279381830119491
29833673362440656643086021394946395224737190702179
86094370277053921717629317675238467481846766940513
20005681271452635608277857713427577896091736371787
21468440901224953430146549585371050792279689258923
54201995611212902196086403441815981362977477130996
05187072113499999983729780499510597317328160963185
95024459455346908302642522308253344685035261931188
17101000313783875288658753320838142061717766914730
35982534904287554687311595628638823537875937519577
81857780532171226806613001927876611195909216420198
93809525720106548586327886593615338182796823030195
20353018529689957736225994138912497217752834791315
15574857242454150695950829533116861727855889075098
38175463746493931925506040092770167113900984882401
28583616035637076601047101819429555961989467678374
49448255379774726847104047534646208046684259069491
29331367702898915210475216205696602405803815019351
12533824300355876402474964732639141992726042699227
96782354781636009341721641219924586315030286182974
55570674983850549458858692699569092721079750930295
53211653449872027559602364806654991198818347977535
66369807426542527862551818417574672890977772793800
08164706001614524919217321721477235014144197356854
81613611573525521334757418494684385233239073941433
34547762416862518983569485562099219222184272550254
25688767179049460165346680498862723279178608578438
38279679766814541009538837863609506800642251252051
17392984896084128488626945604241965285022210661186
30674427862203919494504712371378696095636437191728
74677646575739624138908658326459958133904780275900
99465764078951269468398352595709825822620522489407
72671947826848260147699090264013639443745530506820
34962524517493996514314298091906592509372216964615
15709858387410597885959772975498930161753928468138
26868386894277415599185592524595395943104997252468
08459872736446958486538367362226260991246080512438
84390451244136549762780797715691435997700129616089
44169486855584840635342207222582848864815845602850
```

2. Eric Wegrzynowski me ha comunicado este programa en lenguaje C, que sólo consta de 158 caracteres y es capaz de calcular en pocos segundos 2400 cifras decimales de π, más de las que nunca se pudieron calcular a mano (William Shanks, en 1873, calculó 703, y sólo las 527 primeras eran exactas). Es programa de autor desconocido, encontrado en una mensajería electrónica, que demostraría —si hiciera falta— que π no es un número aleatorio, pues, si lo fuera, el programa necesario para calcular 2400 cifras decimales suyas habría de tener alrededor de 2400 caracteres. No he conseguido averiguar en qué principios se basa la construcción de este extraordinario programa. Notemos la asombrosa singularidad de los seis "9" consecutivos de la séptima centena

EL PRINCIPIO DE LA ACELERACION

La idea de los algoritmos de aceleración consiste en adivinar el límite de una sucesión x_n, suponiendo que esté definida por una fórmula simple.

ALGORITMO DELTA-2 DE AITKEN

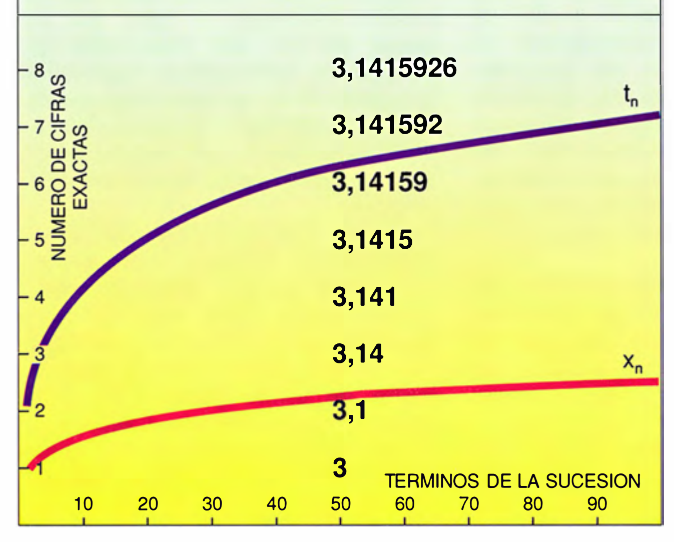
Para calcular t_n se supone que la sucesión es de la forma $L+a \cdot b_n$. A partir de los tres últimos términos de la sucesión:

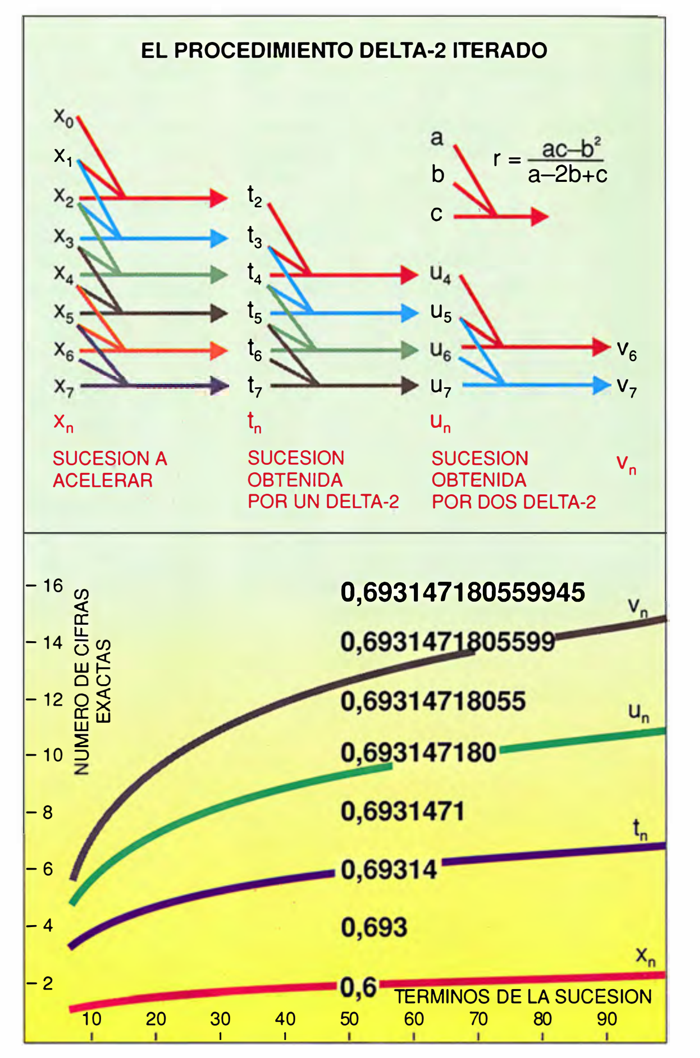
$x_n = L + a \cdot b^n \qquad x_{n-1} = L + a \cdot b^{n-1} \qquad x_{n-2} = L + a \cdot b^{n-2}$

se calcula $t_n = L = (x_n x_{n-2} - x_{n-1}^2)/(x_{n-2} - 2x_{n-1} + x_{n-2})$

ACELERACION DE LA SUCESION DE LEIBNIZ

$x_0 = 4 \quad x_1 = 4(1-1/3) \quad x_2 = 4(1-1/3+1/5) \quad x_3 = 4(1-1/3+1/5-1/7)$...





3. Para tratar de adivinar el límite de una sucesión en la que se conocen tres términos consecutivos, el procedimiento delta-2 de Aitken hace la hipótesis de que se trata de términos de una sucesión geométrica. Si la sucesión x_n *no es geométrica, pero se le parece bastante, los resultados sucesivos de delta-2 generan una secuencia* t_n *que acelera la convergencia de* x_n, *es decir, una sucesión que converge hacia el mismo límite, pero más rápidamente. Se da como ejemplo el caso de la sucesión de Leibniz correspondiente al número* π

4. La fórmula del método delta-2 de Aitken, que transforma x_n *en* t_n, *puede utilizarse de nuevo para transformar* t_n *en* u_n; *después,* u_n *en* v_n, *etc. En ciertos casos, como en el del cálculo de ln2 mediante la fórmula* $1 - 1/2 + 1/3 - 1/4$..., *se obtienen sucesiones que convergen cada vez más rápidamente. Cuanto más se avanza en las iteraciones, mayor es el número de cifras decimales exactas. Todavía es más sorprendente que, en ciertos casos como el del cálculo de ln3 por la fórmula* $ln(1 + x) = x - x^2/2 + x^3/3$ ..., *una sucesión no convergente quede transformada en otra convergente*

nombre de delta-2 iterado: se parte de x_n y se aplica delta-2 una primera vez, lo que origina una sucesión t_n nueva; se aplica por segunda vez delta-2, con lo que se obtiene u_n; después, a partir de u_n, se aplica por tercera vez el procedimiento, lo que proporciona v_n, etc. Los resultados numéricos se disponen en columnas (*véase la figura 4*); no es raro comprobar que cada columna nueva acelera la convergencia de la precedente. Existen, claro está, estudios téoricos que permiten la identificación de las sucesiones que resultan aceleradas por este procedimiento. En ocasiones ocurre que también la diagonal de la tabla así construida posee propiedades interesantes.

Puesto que existen numerosos métodos y no siempre se sabe cuáles utilizar, se han realizado también investigaciones orientadas a ayudar a quienes los usen y que, en concreto, permiten componer y condensar en uno varios métodos. Se toman, por ejemplo, tres métodos de aceleración: el primero transforma x_n en t_n, el segundo convierte x_n en r_n, y el tercero, x_n en s_n. Se les hace funcionar en paralelo (si no se dispone de ordenador en paralelo, se simula el paralelismo) y a la vista de los resultados, un algoritmo de selección —fundado por ejemplo en medidas de estabilidad numérica— retiene uno de los tres números t_n, r_n o s_n como el candidato idóneo para la aceleración de x_n. El usuario puede así disponer "a ciegas" de un método general que se adapta a su sucesión y que —si todo va bien— la acelera (*véase la figura 5*).

Hacer convergente lo que no lo es

Es preciso mencionar otra propiedad de los métodos de aceleración, porque tiene algo de milagroso: ocurre a veces que sucesiones no convergentes se tornan convergentes hacia límites interesantes. El caso de $\ln(1 + x)$ y de delta-2 iterado nos servirá de ilustración.

Sabemos que $\ln(1 + x) = x - x^2/2 + x^3/3 - \ldots$, lo que significa en la prác-

tica que para calcular ln2 (cuyo valor es 0,6931471...) podemos utilizar la sucesión $x_0 = 1$, $x_1 = 1 - 1/2$, $x_2 = 1 - 1/2 + 1/3$, etc. Por este procedimiento encontramos, por ejemplo, que $x_{50} = 0{,}7028550037...$ Si aplicamos el procedimiento delta-2 de Aitken, obtenemos $t_{50} = 0{,}6931481506...$ (otro caso más donde el procedimiento acelera la convergencia). Por el momento, no hay nada nuevo con respecto a la sucesión que convergía hacia π. Pero cuando aplicamos el procedimiento a ln3 aparece un fenómeno muy notable. La fórmula para calcular $\ln(1 + x)$ sólo es válida para $x \leq 1$ (los matemáticos dicen que el radio de convergencia de la serie potencial de $\ln(1 + x)$ es igual a 1). Por lo tanto, no podemos aplicarla con $x = 2$ para calcular ln3. Además, cuando $x = 2$, la serie obtenida no es convergente, pues encontramos:

$$x_0 = 1,\ x_1 = 0,\ x_2 = 2{,}66...,$$

$$x_9 = -64{,}8253...,\ x_{10} = -121{,}3564...$$

Pero si se aplica a esta sucesión el método delta-2 de Aitken se obtienen valores cercanos a ln3 (que vale 1,098612...). Por ejemplo, $t_{10} = 1{,}2391193...$ Aplicando nuevamente delta-2 se obtiene $u_{10} = 1{,}0994152...$, $v_{10} = 1{,}086253879...$ ¿No resulta asombroso que una combinación de valores falsos proporcione un valor de ln3 que tiene exactas las cinco primeras cifras?

Límites de la aceleración de convergencia

Durante bastante tiempo, la investigación sobre aceleración de convergencia consistió principalmente en proponer nuevos algoritmos y estudiarlos. En esa época se tenía, quizá, la esperanza de que siempre se podrían encontrar métodos nuevos, mejores y más generales. Empero, acelerar una sucesión supone, en cierta medida, adivinar lo que la sucesión va a hacer basándose en su comportamiento pasado y, por lo tanto, solamente las sucesiones bastante regulares deberían ser susceptibles de aceleración, lo que nos deja con la clara sensación de que no es posible esperar demasiado en un tal dominio. Existen ciertamente sucesiones "perversas" cuyo comportamiento es tan inesperado que jamás conseguiremos prever adónde "quieren ir". La idea de que no todo es posible en aceleración de la convergencia ha sido ahora formulada con precisión. Citaré a este respecto dos resultados demostrados por Bernard Germain-Bonne y por mí mismo, que han venido a confirmar lo que sospechaban los investigadores de esta especialidad, causándoles asombro en ocasiones.

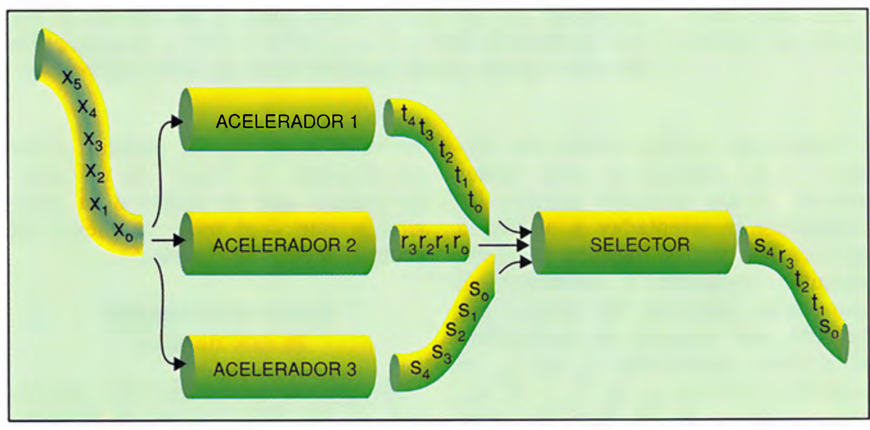
El primer resultado muestra que no es posible acelerar las sucesiones de convergencia lenta más que en casos excepcionales. El segundo, que otro tanto les ocurre a las sucesiones cuya convergencia es muy rápida.

Precisemos más. Se dice que una sucesión es "de convergencia logarítmica" si el cociente del error de dos términos consecutivos $(L - x_{n+1})/(L - x_n)$ se acerca a uno cuando n aumenta (L denota el límite de la sucesión). En sucesiones de este tipo, cuanto más lejos vayamos, menos rápidos serán los progresos. Se conocían muchas sucesiones de convergencia logarítmica que eran aceleradas por uno u otro método, e incluso se tenía la esperanza de que se podría descubrir un método universal de aceleración de las sucesiones de convergencia logarítmica. Después de todo, si son lentas, tendría que ser posible obligarlas a que se dieran un poco de prisa.

Sueño que es preciso olvidar, pues disponemos de una demostración de que ninguna transformación de sucesiones puede ser eficaz para la aceleración de todas las sucesiones cuya convergencia es logarítmica. Dicho de otro modo: cabe esperar la aceleración de ciertas sucesiones de convergencia logarítmica, pero no es posible acelerarlas a todas por un mismo método: hay demasiadas sucesiones de convergencia logarítmica y, a pesar de su aparente regularidad, pueden comportarse de forma tan varia y desordenada que ningún método conseguirá jamás dominarlas globalmente.

El otro resultado concierne a las sucesiones en las que el cociente de los errores de dos términos consecutivos tiende hacia cero. Se trata ahora de sucesiones que convergen más y más rápidamente; el número medio de cifras ganadas en cada iteración va aumentando. Cabría pensar que la aceleración de tales sucesiones no reviste demasiada utilidad. ¡Así es, por fortuna! Porque es imposible. Como ocurría en el caso de las sucesiones de convergencia logarítmica, se ha demostrado ahora que ningún método de aceleración podrá acelerar a la totalidad de las sucesiones en las que el cociente de los errores de dos términos consecutivos tienda a cero.

El principio en que se basan estas demostraciones de imposibilidad viene a ser la analogía matemática de la caza del tigre: se le tiende una trampa al método de aceleración supuestamente existente (que tendría, por ejemplo, la propiedad de acelerar todas las sucesiones de convergencia logarítmica). A tal fin, se le proporcionan ciertas sucesiones especiales y se observa su comportamiento. Al cabo de cierto tiempo sabemos lo suficiente acerca de sus "costumbres"; le preparamos entonces una sucesión que tal método sea incapaz de acelerar. Otro ejemplo de resultado negativo: hemos establecido que la unión de dos familias acelerables no es necesariamente acelerable, lo que demuestra que los métodos de composición de algoritmos aceleradores, mencionados más arriba, no lograrán siempre sin-



5. Los métodos de aceleración de la convergencia son numerosos y, a veces, inestables. Es decir, aceleran la convergencia durante algunas iteraciones, pero luego, a causa por ejemplo de divisiones por números cercanos a cero, proporcionan resultados aberrantes. Para dominar estas dificultades se hacen funcionar simultáneamente varios métodos y se conserva tan sólo el resultado del, digamos, más estable. Obtenemos así un nuevo "supermétodo" que acumula las capacidades de aceleración de los métodos de base (en ciertas condiciones, claro está)

tetizar las buenas propiedades de los métodos de aceleración de que se componen.

Al aplicar métodos numéricos en general y, en nuestro caso particular, al poner en práctica los métodos de aceleración, encontramos dificultades debidas a los errores de redondeo. El estudio matemático de ciertos métodos puede hacer pensar que darán buenos resultados y, sin embargo, una vez programados, revelan ser matemáticamente inestables hasta el punto de que es preciso abandonarlos. Por ejemplo, resulta preferible programar la delta-2 de Aitken en la forma

$$t_n = x_n - (x_n - x_{n-1})^2/(x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2})$$

que hacerlo escribiendo

$$t_n = (x_n x_{n-2} - x_{n-1}^2)/(x_n - 2x_{n-1} + x_{n-2}),$$

a pesar de ser matemáticamente equivalentes, pues la segunda es numéricamente inestable.

Los obstáculos de este tipo resultan extremadamente difíciles de esquivar y, exceptuadas unas pocas técnicas (de simulación e introducción de ruido numérico), tan desvalidos nos encontramos hoy por hoy ante ellos, que lo mejor es evitarlos. Tales fenómenos son sin duda consecuencia ineludible del matrimonio obligado entre las matemáticas del continuo y los ordenadores. Se trata claramente de una unión *contra natura*, pues lo normal es que los ordenadores manejen números reales truncados, lo que provoca, por ejemplo, que la evaluación de $(1 + 10^{-20} - 1) \times 10^{20}$ dé resultado 0 en lugar del resultado exacto, que es 1 (¡compruébelo!). Tenemos sin duda una solución en el cálculo formal, que por representar los números reales en aritmética racional exacta (las fracciones se dejan en forma de fracción), respeta mejor el continuo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RAMANUJAN, MODULAR EQUATION AND APPROXIMATION TO PI, OR HOW TO COMPUTE ONE BILLION DIGITS OF PI. J. M. Borwein y P. B. Borwein, en *American Mathematical Monthly*, volumen 95, número 3, páginas 201-220, 1990.

EXTRAPOLATION METHODS: THEORY AND PRACTICE. C. Brezinski y M. Redivo Zaglia, North-Holland, 1992.

SEQUENCE TRANSFORMATIONS. J.-P. Delahaye, Springer-Verlag, Berlin, 1988.

THE SET OF LOGARITHMICALLY CONVERGENT SEQUENCES CANNOT BE ACCELERATED. B. Germain-Bonne y J.-P. Delahaye, en *SIAM J. Numer. Analysis*, volumen 19, páginas 840-844. 1982.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Lo último sobre partículas fórmicas

El vestíbulo del hotel era un auténtico pandemónium. Había maletas y mochilas apiladas por todas partes. Me pregunté por centésima vez si había sido buena idea asistir al Congreso Quinquenal de la SFM. Eché otra ojeada a la cola de la recepción y opté por pasar al bar del hotel. Más o menos la mitad de los participantes en este congreso de la Sociedad de Filosofía Matemática había tenido la misma idea.

Inmediatamente a mi izquierda, una dama de unos sesenta y tantos años, vestida con elegancia, discutía acaloradamente con la que parecía ser el epítome de la parla adolescente. Una mujer delgada con pelo pincho lucía en una camiseta de manga corta el rótulo "Observe este Espacio". Del otro lado, una exaltada especialista en lógica borrosa se afanaba en explicar a tres constructivistas escépticos una ampliación flexible de la lógica tradicional, mientras ellos, por su parte, aspiraban a conferirle mayor rigidez. Y en un rincón, un tipo que prometía ser un latazo se dedicaba a teclear frenéticamente en su ordenador portátil.

Sonreí y empecé a sentirme de mejor humor. Parecía que, por lo menos en el plano intelectual, el viaje iba a ser tan interesante como había esperado. Me presenté a la pelopincho de la camiseta, que resultó llamarse Luisa. "Estoy observando", dije.

"¿Qué...?"

"Este espacio", rematé. "Pero no veo nada inesperado."

Me dedicó una mirada zumbona, como si quisiera averiguar si yo sería un ligón. "Es por la Ecuación", aclaró la joven. "O sea, a ver, cuando sea descubierta."

"¿La Ecuación...?"

"La verdad, no confío demasiado en que se produzcan progresos rápidos ahora que esos memos del Congreso norteamericano han cancelado el Supercolisionador Superconductor."

"¡Ah! Ya sé de qué ecuación hablas. Te refieres a la Teoría de Todo." La chica era una fundamentalista; tenía que haberme dado cuenta antes.

"Puedes tomarlo a guasa, si quieres", dijo ella un poco mosqueada. Empecé a mover negativamente la cabeza para indicar que no había tenido la intención de burlarme. "Yo me limito a creer que todo cuanto hay en el universo está regido por una sola ley fundamental, y que el propósito principal de la ciencia ha de consistir en averiguar cuál es."

"Ya. Pero, aun suponiendo que existiera, ¿qué te hace pensar que sea una ley matemática?", terció la flor de la adolescencia.

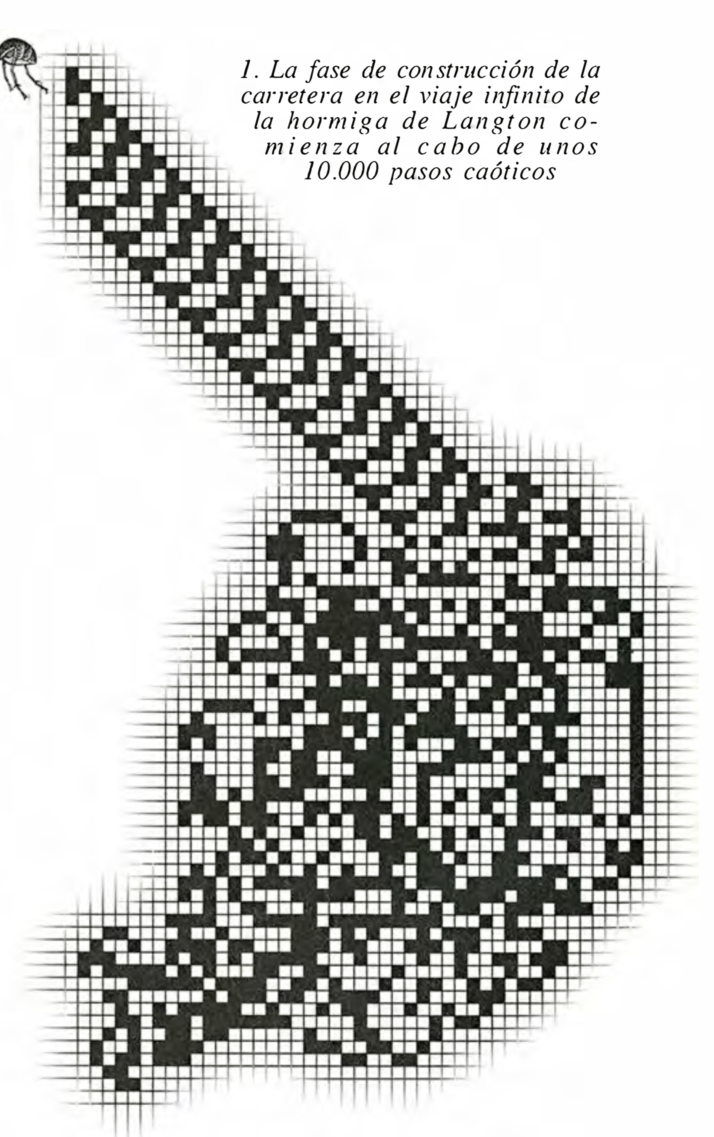
"La misma palabra 'ley' indica una precisión que sólo podemos encontrar en las matemáticas. De hecho, podemos definir las matemáticas como la ciencia de las consecuencias lógicas de leyes sencillas y precisas."

"¿Qué entiendes 'exactamente por lógicas'?", indagó uno de los constructivistas.

"¿Qué entiendes al decir 'precisas'?", preguntó la de la lógica borrosa, que se llamaba Inés. El congreso estaba en marcha.

"Lo que importa es que en cuanto hallemos las leyes de la naturaleza podremos deducir todo lo demás", dijo Luisa. "En lugar de un embrollado parcheo de teorías meramente aproximadas, podremos conocer la verdad."

"Me parece que todos vosotros estáis planteando el debate en un nivel inadecuado", solté yo. "Hace cosa de sólo cien años que los matemáticos demostraron que *en principio* todo el futuro del universo está determinado por su estado actual, lo cual desembocó en una imagen de un universo 'de relojería' y en la idea de que las leyes sencillas generan necesariamente comportamientos simples. Pero cuando se empezó a reflexionar seriamente sobre lo posible *en la práctica*, descubrieron el caos, vale decir, que leyes sencillas generan comportamientos extremadamente complejos y que los sistemas determinísticos pueden comportarse de forma aleatoria. Supongamos, por seguir el razonamiento, que tienes razón. Supongamos, pues, que el universo allá en lo más básico se atiene realmente a un sistema sencillo de leyes funda-



1. La fase de construcción de la carretera en el viaje infinito de la hormiga de Langton comienza al cabo de unos 10.000 pasos caóticos

mentales, y que nosotros las descubrimos. ¿Nos ayudará eso a comprender de verdad el mundo en que vivimos?"

"¡Desde luego que sí!", exclamó Luisa. "En primer lugar, dispondríamos de un cañamazo filosófico básico. Y en segundo, el comportamiento de nuestro mundo, a escala humana, se encuentra necesariamente implícito en las leyes fundamentales y, en consecuencia, las leyes lo explicarán todo."

"En teoría, tal vez sí. Pero no en la práctica. Por ejemplo, en el universo de escala humana, a los gatos les gusta perseguir ratones. No creo que tus leyes 'fundamentales' explicasen eso, a menos que pudieras presentar una deducción convincente, que partiera de tus ecuaciones y acabara en el hecho de que a los gatos les gusta perseguir ratones. ¿Cómo piensas hacerlo?"

"Aunque fuera posible llevar a cabo los cálculos, serían de una enormidad imposible y totalmente incomprensibles. No, lo malo de las Teorías de Todo es que parten de un concepto de 'explicación' que es erróneo. Una explicación consiste en un razonamiento explícito que conduce desde la hipótesis hasta la conclusión; no consiste en una declaración genérica de que la conclusión se halla implícita en las hipótesis. Y, desde luego, no puede consistir en un rimero de impresos de ordenador de 1000 kilómetros de alto que pretenda hacer explícito lo implícito."

El pasmón del rincón se levantó. "Dejadme que os enseñe una cosa." Plantó su portátil sobre la mesa. "Mirad la pantalla." Apareció una plantilla de pequeñas cuadrículas. "Eso es una hormiga, ¿de acuerdo?"

"¿Dónde está?"

"En el centro. Lo que pasa es que es invisible. Ahora os la enseño." Volvió a hacer clic. Algo empezó a corretear frenéticamente de un lado a otro del cuadriculado, dejando en pos un rastro aleatorio de cuadraditos blancos y negros. La cosa continuó más o menos un minuto y tras construir una banda diagonal con un motivo muy curioso acabó desapareciendo por un borde de la pantalla.

"Fascinante", dijo Luisa. "Ahora, como decía acerca de la Ecuación..."

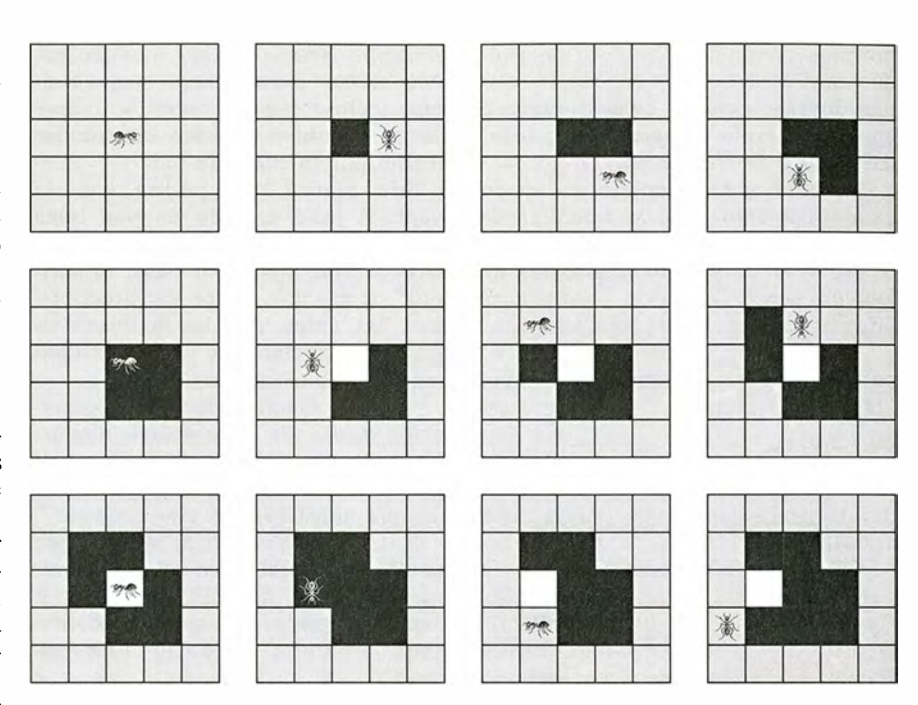
"Luisa", cortó el recién llegado, "si me dejas explicar lo que acabas de ver comprenderás que viene muy al caso de lo que estabais discutiendo."

"Tú siempre dices lo mismo, Natán, incluso si se trata de una partida de Dougal el Dugong."

"Suspende el juicio unos minutos y justificaré lo que afirmo. Lo que acabáis de ver es un sistema matemático conocido como *hormiga de Langton*. Se trata de un autómata celular muy sencillo, inventado por Chris Langton, del Instituto de Santa Fe."

"¿De la panda esa que se dedica a la teoría de la complejidad?"

"Exactamente. Buscan regularidades macroscópicas en sistemas complejos. Tenemos un ejemplo sencillo en la hormiga de Langton. La hormiga sale de la casilla central, orientada en una cierta dirección, por ejemplo, hacia el Este. Se desplaza una cuadrícula en esa dirección y mira el color del cuadro en que se posa, para saber si es blanco o negro. Si ha ido a parar a una casilla negra, la pinta de blanco y gira 90 grados hacia la izquierda; si se posa en una blanca, la pinta de negro y gira 90 grados hacia la derecha. La



2. Los 12 primeros pasos que da la hormiga de Langton. (Para mayor claridad, los cuadros no visitados todavía se muestran en color gris; al aplicar la reglas deben considerarse blancos.)

Teorema de Cohen-Kong

No hay dificultad en comprobar que la Teoría de Todo referente a la hormiga de Langton es reversible en el tiempo; es decir, que la configuración y la orientación actuales determinan inequívocamente tanto el pasado como el futuro. Cualquier trayectoria acotada ha de acabar por repetir la misma configuración, posición y orientación, y por la reversibilidad, tal trayectoria habrá de ser periódica, y repetirá indefinidamente los mismos movimientos. Así pues, cada una de las casillas visitadas habrá de ser visitada infinitas veces. El movimiento de la hormiga es alternativamente horizontal y vertical, porque su dirección cambia 90 grados en cada paso. Una casilla es H si se llega a ella horizontalmente, y V, si verticalmente. Las casillas H y V pavimentan el cuadriculado de manera similar a las casillas blancas y negras de un tablero de ajedrez.

Seleccionemos una casilla M que sea visitada por la hormiga y que se encuentre tan arriba y a la derecha como sea posible, en el sentido de que las casillas inmediatamente situadas a su derecha o por encima de ella nunca hayan sido visitadas todavía. Supongamos que se trate de una casilla H. En tal caso, la hormiga tuvo que llegar a M desde la izquierda y salir de M dirigiéndose hacia abajo y por ello, M tiene que ser blanca. Pero ahora M se vuelve de color negro, por lo que en su próxima visita la hormiga saldrá hacia arriba, visitando una casilla que nunca ha sido visitada. El mismo problema se presenta si M es una célula V. Esta contradicción demuestra que no existen trayectorias acotadas.

hormiga continúa aplicando indefinidamente esas mismas reglas. Ya visteis lo que ocurrió cuando empezó en una plantilla completamente blanca" [*véase la ilustración 2*].

"Es curioso lo complejo que es su comportamiento dada la sencillez de las reglas", comenté yo.

"Ya ves, Luisa, que las reglas de Langton son la Teoría de Todo para el universo en que habita esta hormiga."

"Fijaos en la extraña secuencia de perfiles que va creando la hormiga. Durante los primeros 500 pasos o así vuelve constantemente a la casilla central, dejando en pos una serie de motivos bastante simétricos. Después, más o menos durante los 10.000 pasos siguientes, la figura se torna muy caótica. De repente, casi como si la hormiga hubiera decidido lo que desea hacer, construye una "carretera", como la llamó su descubridor, James Propp, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. La hormiga sigue repetidamente una secuencia que consta de 104 pasos exactamente, que la desplaza dos casillas hacia el sudoeste, y prosigue así indefinidamente, formando una banda diagonal" [*véase la ilustración 1*].

"Asombroso", comenté. En cambio, el rostro de Luisa parecía decir: Bueno, ¿y qué?

"Lo verdaderamente asombroso", prosiguió Natán, "es que siempre parece acabar construyendo una carretera, incluso aunque antes de empezar se siembren a voleo cuadrículas negras por la plantilla."

"Me parece que podría hacerla empezar justo al lado de una línea infinita de cuadrículas negras y obligarla a irlas siguiendo hasta el infinito", terció uno de los constructivistas. "Lo único que he de hacer es ajustar correctamente la separación entre esas cuadrículas."

"Perdón. Querrás decir una disposición *finita* de cuadrículas negras. Sin embargo, todavía no se ha podido demostrar que la hormiga acabe siempre construyendo una carretera."

"¿Se ha podido demostrar algún resultado general sobre el comportamiento de la hormiga de Langton cuando empieza con una disposición finita arbitraria de cuadrículas negras?"

"Sí", respondió Natán. "E. G. D. Cohen y X. P. Kong, de la Universidad Rockefeller, demostraron que la trayectoria de la hormiga es necesariamente no acotada. La hormiga se sale de cualquier región finita" [*véase el recuadro*].

"¿Pero qué tiene que ver todo esto con la Ecuación?", preguntó Luisa.

"Conocemos la Teoría de Todo para la hormiga de Langton", respondió Natán. "Sabemos las reglas; nosotros las establecemos. Y sin embargo, nadie sabe responder a un pregunta sencilla: si partimos de un 'ambiente' arbitrario compuesto por un número finito de casillas negras, ¿llega siempre la hormiga a construir una carretera?"

"¿Quiere decir esto que en este caso la Teoría de Todo carece de valor explicativo?", dije, pensando en voz alta.

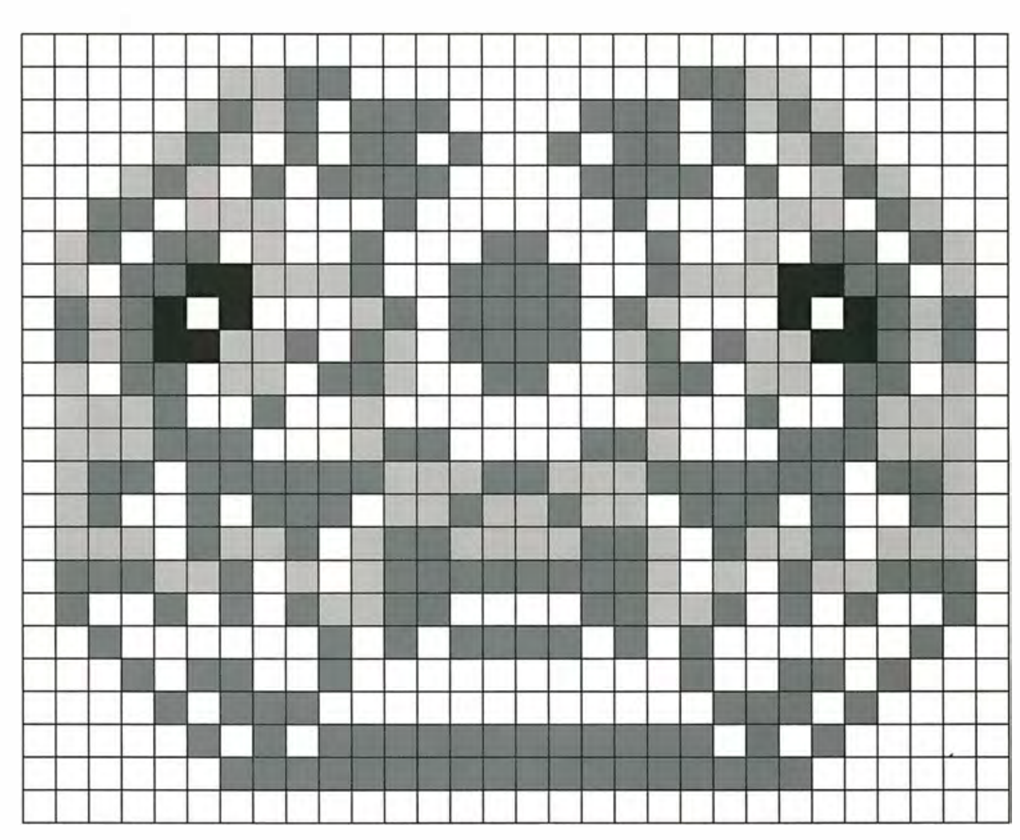
"Exactamente. Lo predice todo, pero no explica nada. En cambio, el teorema de Cohen-Kong *explica* por qué no son acotadas las trayectorias."

"Observo varios fallos en tu razonamiento", señaló Luisa. "En primer lugar, el teorema de Cohen-Kong es una *consecuencia* de la Teoría de Todo, la cual, por consiguiente, sí posee algún valor explicativo. Y después, tu argumento se funda en la ignorancia. Puede que mañana aparezca alguien con una demostración de que las hormigas siempre han de construir carreteras."

"Concedido. Pero es justamente el hacer explícita la consecuencia de Cohen-Kong lo que explica la no acotación de las trayectorias. Puedes invocar la unicidad de las consecuencias de la Teoría de Todo hasta que la cara se te ponga azul, pero eso, por sí solo, no te dirá si existe o no una trayectoria acotada. Análogamente, aunque conocemos la Teoría de Todo, no tendremos ni idea de si la construcción de carreteras es norma universal hasta que alguien lo demuestre con carácter de consecuencia explícita. O hasta que lo refute."

"Me da la impresión de que estás afirmando demasiadas cosas basándote en un solo ejemplo excepcional", intervine yo.

"A mí me parece que no", contraatacó Natán. "La hormiga de Langton es un caso típico de los sistemas que se basan en reglas. Hay muchísimas generalizaciones, de comportamientos sorprendentes, y lo que es más sorprendente aún, exhiben también regularidades comunes. Os resultará entretenido colocar una o varias hormigas en un ambiente determinado y observar lo que hacen. Podéis cambiar las reglas o preparar diversos ambientes; por ejemplo, se pueden usar



3. Configuraciones simétricas que se producen al aplicar determinadas reglas-ristra. La configuración que vemos corresponde al paso 16.464 de la hormiga 1100

reticulados hexagonales en lugar de cuadriculados. Lo mejor es utilizar un ordenador, pues los programas para aplicar las reglas son sencillos. Debería añadir que estas ideas también tienen su aspecto práctico: están relacionadas con ciertos problemas de la mecánica estadística, concernientes a disposiciones de partículas —'hormigas'— que en un momento dado sólo pueden encontrarse en uno de varios estados... las 'casillas coloreadas'."

"Pues bien, Greg Turk, de la Universidad de Stanford, y, por su parte, Leonid A. Bunimovich, del Instituto de Tecnología de Georgia, y S. E. Troubetzkoy, de la Universidad de Bielefeld, han investigado las hormigas generalizadas, definidas por una regla-ristra. Supongamos que en lugar de poder ser sólo blancos o negros, los cuadrados pueden ser de n colores, que señalaremos 0, 1, 2, ..., $n-1$. La regla-ristra consiste en una secuencia de n símbolos 0 o 1. Cuando la hormiga abandona una casilla de color k, la cambia al color $k+1$ (de forma cíclica, esto es, volviendo a empezar con 0 en el caso $((n-1)+1)=\mathrm{n}$). La hormiga gira a la derecha si el k-ésimo símbolo es 1 y hacia la izquierda si es 0. Avanza un cuadrado y repite."

"Las reglas originales de Langton se resumen en la regla-ristra 10. Ciertas ristras proporcionan a la hormiga dinámicas triviales; por ejemplo, la hormiga de ristra 1 (o 111...1, si se quiere), se dedica eternamente a dar vueltas a un cuadrado de 2×2. En cambio, cualquier ristra que contenga al 0 y al 1 ha da dar lugar a trayectorias no acotadas, por la idea de Cohen y Kong."

"Supongamos, por sencillez, que se parte de un cuadriculado 'limpio', en el que todas las casillas son de color 0. La hormiga 100 crea pautas que inicialmente se asemejan bastante a las de la hormiga de Langton: simétricas primero y luego caóticas. A diferencia de ésta, sin embargo, al cabo de 150 millones de pasos sigue todavía comportándose caóticamente. ¿Llega a construir una carretera? No se sabe. La hormiga 110 sí construye carretera, y sólo necesita 150 pasos para llegar a esa fase. Además, necesita un ciclo de sólo 18 pasos para crear la carretera, en lugar de los 104 que requiere la de Langton. La hormiga 1000 es infatigablemente caótica. Aunque la 1101 comienza caóticamente, inicia su carretera al cabo de 250.000 pasos, con un ciclo de 388. La hormiga 1100 procede a construir motivos cada vez más complejos, que en infinidad de ocasiones poseen simetría bilateral [*véase la ilustración 3*]. No puede, por lo tanto, construir ningún tipo de carretera en el sentido habitual."

"Desafío a cualquiera para que dé una clasificación sencilla y breve de los comportamientos de todas estas hormigas generalizadas o a que pronostique, basándose en su regla-ristra, cuál será su comportamiento a largo plazo, incluso arrancando en una cuadrícula limpia", concluyó Natán.

Luisa no parecía muy feliz. "Ya, pero tampoco has demostrado que no haya nadie capaz de hacerlo."

"Eso es verdad", apostillé. "Pero con reglas de transición muy poco más complicadas se originan ya casos como el del juego 'Vida' de John Horton Conway. Y Conway ha demostrado que en Vida existen configuraciones equivalentes a máquinas universales de Turing, léase, ordenadores programables. Alan M. Turing, por su parte, demostró que el comportamiento a largo plazo de una máquina de Turing es indecidible. Por ejemplo, es imposible determinar por adelantado si el programa llegará a terminar o no. Traducido a Vida, eso significa que la pregunta '¿Crece ilimitadamente esta configuración?' es formalmente indecidible. Tenemos aquí un caso en el que conocemos la Teoría de Todo y también una pregunta sencilla que puede demostrarse que es imposible responder basándose en aquella teoría."

"Exactamente", remachó Natán. "Así pues, ¿por qué piensas que una Teoría de Todo real puede constituir la 'respuesta definitiva' en cualquier acepción de esta expresión que signifique algo?"

"No lo sé", suspiró Luisa. Meneó la cabeza pesarosa, pero enseguida volvió a animarse. "Es un jarro de agua fría, la verdad."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WINNING WAYS, VOL. 2: FOR YOUR MATHEMATICAL PLAYS: GAMES IN PARTICULAR. Elwyn R. Berlekamp, John H. Conway y Richard K. Guy. Academic Press, 1982.

JUEGOS DE ORDENADOR. A. K. Dewdney, en *Investigación y Ciencia*, números de noviembre de 1989, págs. 143-146, y de mayo de 1990, pág. 92.

MATHEMATICAL ENTERTAINMENTS. David Gale en *Mathematical Intelligencer*, vol. 15, n.º 2, págs. 54-55; primavera de 1993.

FURTHER ANT-ICS: TRAJECTORY OF GENERALIZED ANTS. Jim Propp en *Mathematical Intelligencer*, vol. 16, n.º 1, páginas 37-42; invierno de 1994.

ORDEN Y CAOS. Prensa Científica. Barcelona, 1990.

Libros

Joandomènec Ros, Carlos Gracia, E. Rodríguez Ocaña y Carlos Castrodeza

Biología marina

Cnidarios

ASPECTS OF HYDROZOAN BIOLOGY (dirigido por J. Bouillon, F. Boero, F. Cicogna, J. M. Gili y R. G. Hughes);

PLANKTONIC CNIDARIANS OF THE BENGUELA CURRENT (de F. Pagès, J. M. Gili y J. Bouillon). Monografías de *Scientia Marina* (volumen 56, número 2-3 y suplemento 1, respectivamente). Instituto de Ciencias del Mar (CSIC). Barcelona, 1992.

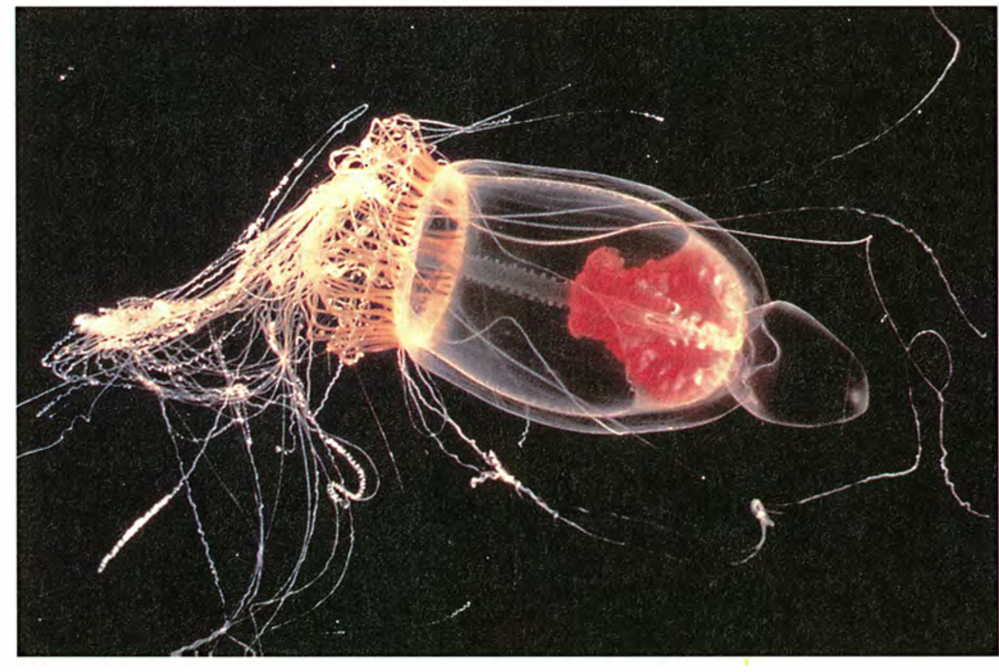
Estos dos volúmenes (que pertenecen a una serie de monografías científicas de la que en estas páginas ya se han comentado algunos títulos) comparten algo más que el estar dedicados a un mismo tipo taxonómico, los Cnidarios. Por un lado, los editores y autores, destacados especialistas mundiales en el grupo. Por otro, una cobertura geográfica amplia (prácticamente todo el mundo el primero) y exótica (las aguas que bañan las costas sudafricanas el segundo). Y todavía otra, una elevada calidad de los textos, la ilustración y la edición en general. Circunstancias todas ellas que suelen ser relativamente insólitas en la producción naturalista de estos pagos.

El primer volumen congrega algunas de las comunicaciones que se presentaron en el *Second International Workshop on Systematics, Ecology and Evolution of Hydrozoa*, reunión de trabajo de The Hydrozoan Society que tuvo lugar en el Centre d'Estudis Avançats de Blanes el verano de 1991, y en la que durante dos semanas una treintena de especialistas en hidrarios de todo el mundo intercambiaron información y, lo que es más importante, se pusieron de acuerdo para unificar criterios, establecer planes de trabajo y abordar problemas candentes en su campo. En este sentido, *Aspects of Hydrozoan Biology* es mucho más que unas actas de congreso: algunos de los 22 artículos publicados suponen directrices a seguir en la investigación del grupo, avaladas por los más importantes especialistas del mismo. Es, pues, un texto de obligada consulta para todos los estudiosos de los hidrarios, y para los biólogos marinos en general. Aproximadamente la cuarta parte de estos artículos son firmados por especialistas del país, y ello sólo ya constituye un hecho destacable e indicativo del nivel que la investigación en biología marina (como en otros campos) está alcanzando, por fin, en la península.

Se trata en dichos artículos la dinámica de las poblaciones planctónicas y bentónicas, de hidrarios; se estudia en detalle el comportamiento alimentario, reproductor y de desarrollo de algunas especies, la distribución y biogeografía de otras, y se aborda el estudio ultraestructural de algunas de ellas. Los artículos metodológicos, en especial, son de utilidad más allá del campo concreto de estudio de los autores (sobre transporte, conservación a largo plazo y almacenamiento de organismos planctónicos gelatinosos; sobre macrofotografía de organismos a bordo de buques de investigación; sobre nuevos caracteres útiles para los taxónomos).

Ya que la monografía se ha publicado en inglés (destino fatal de toda publicación de la que se pretende la difusión en la comunidad científica) digamos, para acabar, que el volumen comentado reúne el *state of the art* de la sistemática, la ecología y la evolución de esta clase de cnidarios.

Planktonic Cnidarians of the Benguela Current tiene un origen muy distinto. Sería fácil contraponer al volumen colectivo anterior éste, surgido de una tesis doctoral, como resultado de la actividad de una sola persona. Pero sería injusto. Porque no sólo está aquí reflejada la labor del antiguo doctorando (Pagès), sino la del director de la tesis (Gili), la de los especialistas mundiales consultados a lo largo del estudio (entre ellos, Bouillon), la del magnífico dibujante (J. Corbera), la del director del programa "Estudio de las pes-



Neoturris pileata

querías del Africa austral" (E. Macpherson), que durante más de diez años puso en contacto a especialistas españoles con la naturaleza de la vida oceánica de aquella remota región, y a todos los participantes en las numerosas campañas oceanográficas que se desarrollaron en el área de uno de los principales afloramientos mundiales, origen de una importante producción biológica y pesquera.

El resultado es una valiosa monografía que, en sendos capítulos (más un anexo con los datos de las estaciones oceanográficas), aborda la descripción minuciosa y el estudio taxonómico detallado de las medusas y los sifonóforos del Atlántico sudoriental (64 especies de medusas y 52 de sifonóforos). El trabajo establece la distribución de las distintas especies y pone orden en la sistemática de estos grupos planctónicos, eslabones fundamentales (y hasta ahora poco conocidos globalmente) en el trasiego de la energía desde el fitoplancton a los niveles tróficos superiores.

Sirva este comentario para recordar que no sólo las especies comerciales de peces son objeto de estudio en programas de investigación pesquera como el citado, sino todas las implicadas en la biología de las primeras, así como los factores ambientales. Si a veces los políticos de los que depende la planificación de la investigación científica olvidan estos extremos, es bueno señalar que este trabajo es uno de otros muchos (algunos ya publicados) dedicados a la descripción y funcionamiento de la región de la corriente de Benguela, que en pocos años puede convertirse en una de las áreas mundiales de afloramiento mejor conocidas, gracias en buena parte a la labor, no siempre suficientemente divulgada, de los investigadores del Instituto de Ciencias del Mar (ICM).

Con la publicación de estas monografías y de otras que se han comentado en estas páginas (en los números 169 y 188 de *Investigación y Ciencia*), dicho instituto de investigación del CSIC reemprende una tradición que se había truncado y que en su tiempo produjo, entre otros textos fundamentales para la zoología marina, *Crustáceos decápodos ibéricos* (1968) y *Foraminíferos ibéricos* (1974). Ya he comentado asimismo la bondad de la edición de las dos monografías. Tanto la política editorial del centro que ha permitido la citada recuperación como el nivel de calidad, en el fondo y en la forma, son méritos del equipo directivo de *Scientia Marina*, y en especial del director de la revista, Gili. Enhorabuena al ICM, a *Scientia Marina* y a los responsables de que la ciencia marina en general, y la de nuestro país en particular, encuentre vehículos de difusión tan dignos como los comentados. (J.-D. R.)

Ecología

Generalidades

ECOLOGÍA: BASES CIENTÍFICAS PARA UN NUEVO PARADIGMA, por Eugene P. Odum. Editorial Vedrà; Barcelona, 1993.

A un título sugerentemente innovador le sigue un prólogo cuyo contenido resulta igualmente prometedor: el vuelo del *Apolo 13*. En él el autor analiza algunos rasgos característicos del viaje de la nave para utilizarlos, a título comparativo, con los sistemas sustentadores de vida de la Tierra. El prólogo contiene, asimismo, una referencia a los experimentos de la denominada Biosfera II, la cápsula experimental autorregenerativa en la que han vivido ocho personas durante algo más de un año tratando de autorregular tanto la producción de alimento como las características del medio.

A este prólogo siguen ocho capítulos y un epílogo que, en poco menos de 300 páginas, tratan de revisar los conceptos generales de la ecología. Naturalmente, tal carga de conceptos en tan reducido número de páginas no puede hacerse sino a costa de sacrificar el detalle y la riqueza de matices que poseen muchos de los problemas analizados.

Los tres primeros capítulos describen el ambiente vital y los niveles de organización hasta llegar al ecosistema. Algunos casos particulares se utilizan para ilustrar conceptos generales. Así, por ejemplo, se analizan el caso de la ensenada de Nueva York, el del río Illinois o el ejemplo de las plagas de insectos. Una buena manera de mantener al lector próximo a la realidad cotidiana que se plantea la ecología.

El flujo de energía y los ciclos de la materia constituyen el tema de los capítulos cuatro y cinco, antes de entrar en un análisis de la ecología de poblaciones y la sucesión (capítulos 6 y 7) para acabar con una revisión de los principales tipos de ecosistemas.

En general la obra en su conjunto permite adquirir al lector desconocedor de la ciencia de la ecología unos conocimientos generales y aproximarse a los problemas medioambientales que preocupan al ciudadano medio desde una perspectiva rigurosa. Sin duda, este lector encontrará que muchas de sus inquietudes quedan apenas respondidas en las páginas de la obra ya que se pasa a vuela pluma por encima de muchos problemas. Como ejemplo, especialmente significativo para los habitantes de las áreas mediterráneas del planeta, baste citar que al papel del fuego como factor ecológico se le dedica poco más de una página, en la que se encuentra una referencia al fuego controlado y a las principales comunidades vegetales adaptadas al fuego.

El lector algo más introducido en el campo de la ecología y, posiblemente, conocedor de las anteriores obras del autor, algunas tan conocidas como sus *Fundamentos de Ecología* (Ed. Interamericana, México, 1985), reconocerá con facilidad la mayor parte de las gráficas y fotografías —de calidad manifiestamente mejorable— que ilustran la obra.

En definitiva nos encontramos ante un libro de ecología que, más allá de lo sugerente del título, puede constituir un buen ejemplo de divulgación altamente recomendable para lectores no especialistas o para estudiantes del primer año de las facultades de biología. (C. G.)

Ideas e instituciones

En medicina

EXPLAINING EPIDEMICS AND OTHER STUDIES IN THE HISTORY OF MEDICINE, por Charles E. Rosenberg. Cambridge University Press, Cambridge-Nueva York-Victoria, 1992.

Se recogen bajo este título 16 ensayos de este conocido autor, en la actualidad catedrático de historia y sociología de la ciencia en la Universidad de Pennsylvania y presidente en activo de la *American Association for the History of Medicine*, que es uno de los eslabones vivos (se inició en historia de la medicina por influencia de Erwin Ackerknecht) de la estrecha cadena que enlaza el programa de historia social de Henry Sigerist con su triunfo a partir de los setenta. Al mismo tiempo, su obra muestra los cambios sufridos por dicha orientación hacia la "nueva historia cultural", con una posición menos dogmática y más crítica que la

de los fundadores de la escuela en lo que se refiere a los propios fundamentos de su trabajo y más integradora y positiva que la de los radicales deconstruccionistas de los setenta. En suma, un representante sereno y lúcido de esta era postrelativista que alumbra el fin del milenio.

La recopilación se estructura en una introducción general y tres apartados, titulados, respectivamente, "Ideas en acción", "Asistencia e instituciones médicas" y "El pasado en el presente. Los usos de la historia de la medicina". La introducción hace un breve recorrido por el sentido de la historia de la medicina, como actividad intelectual, sin entrar en muchos detalles. Frente a la desintegración disciplinar traída por los nuevos vientos, su posición particular insiste en el carácter integrador del ejercicio histórico-médico, hasta el punto de concluir que "la división convencional entre acercamientos intelectuales, sociales e institucionales carece de justificación teórica" (p. 6). Y para muestra, lo que sigue.

Los seis trabajos que se recogen en el primer apartado fueron publicados entre 1966 y 1989 y se refieren a distintos aspectos de la teoría médica, en el contexto, tan caro a su autor, de su medio social de producción y expansión. Se esfuerza por reconocer la interrelación entre medio y conocimiento, entre autores y espectadores, entre médicos y pacientes, concediendo valor explicativo a la peculiar forma de entrecruzamiento de dichas realidades, vinculadas sin remisión al mundo de los valores: la moral, la política, la clase o el género.

En el segundo apartado se nos entregan cuatro trabajos más, publicados entre 1967 y 1990, centrados sobre el aspecto profesional del ejercicio médico. A diferencia de la tradicional historia *médica* de la medicina, la que se realiza desde las filas de la profesión con el objetivo más o menos explícito de producir un refuerzo legitimador de la misma, la orientación social y neocultural de Rosenberg le lleva a incidir en los aspectos sociológicos que provocan la variabilidad de las imágenes profesionales, la trascendencia de las decisiones científicas en beneficio de determinadas carreras profesionales o la modulación de éstas en función de otros intereses sociopolíticos, como en el caso de la dinámica hospitalaria.

La última parte del libro que comentamos incluye otros seis capítulos y, a mi entender, es la más provechosa para el lector hispano, puesto que corresponden a publicaciones menos habituales en nuestras bibliotecas, originadas entre 1975 y 1992. Al mismo tiempo, su temática la dota de una acuciante actualidad, buscada por el autor, puesto que se trata de explorar las posibilidades esclarecedoras de la historia en relación con problemas de hoy mismo: la crisis psiquiátrica, el sida, el sistema hospitalario. Es decir, se ofrece una respuesta práctica al ¿para qué sirve la historia de la medicina?, la permanente reclamación de utilidad que se dirige a nuestra disciplina desde fuera y desde dentro de la misma (tema estrella que ha sido en la última reunión de la sociedad Española de Historia de la Medicina, celebrada en San Sebastián en la primavera de este 1994).

En estos capítulos se encuentran las exposiciones más claras de la perspectiva metodológica aplicada por Rosenberg. Me parece justo destacar el titulado "Enfermedad y orden social en América", originalmente publicado en la revista de la Fundación Milbank (1986), puesto que en él examina las diferencias entre las distintas opciones historiográficas que se han sucedido desde los tiempos de Sigerist a la luz de su contexto social. Una característica significada de la primera historia social de la medicina, recuerda Rosenberg, fue su confianza en la ciencia. Para Sigerist o Shryock, incluso para Rosen, resultaba impensable que, en un momento determinado, la ciencia médica no coincidiera con las fuerzas del progreso, esto es el igualitarismo y la ilustración. Los problemas que ellos captaban correspondían al "mal uso" de los recursos científicos o asistenciales; en absoluto se plantearon que algunos problemas derivaran de la propia naturaleza del conocimiento científico dominante. La crítica anticientífica de los sesenta y setenta ha determinado otra situación; como gráficamente expresa el autor, "hemos conocido el futuro de Sigerist y no nos termina de convencer" (*in some ways it seem not to have worked*) (p. 263). En relación con la medicina, el desvelamiento del empleo de la enfermedad como estigma para marginar a ciertos sectores sociales, la crisis de gasto unida a la crítica a un sistema asis-



Hayes Agnew realizando una intervención quirúrgica en 1886

tencial centrado en el tratamiento de los casos agudos y sometido a criterios reparadores de la fuerza de trabajo, así como los costes sociales del envejecimiento de las poblaciones occidentales y la alta prevalencia de enfermedades crónicas y degenerativas se han unido a la reclamación antiautoritaria y al rechazo a la marginación de los pacientes.

La crítica intelectual, desde las perspectivas de la sociología del conocimiento y de las profesiones, la antropología y otras ciencias sociales han permitido alcanzar una nueva percepción de los fenómenos y han cargado de ambigüedad la medicina, las enfermedades y el propio sentido de las profesiones sanitarias. Por ejemplo, advertir la carga legitimadora de su función social que tiene la propia actividad médica, al mismo tiempo que sus formulaciones permiten sancionar ciertos comportamientos y reforzar las normas morales, de clase y de género de las sociedades concretas. Y más allá de estas nociones teóricas, los distintos capítulos dedicados al sida muestran el valor de las mismas en acción.

Es fundamental en el pensamiento de Rosenberg la noción de que las enfermedades son algo más que problemas biológicos; de hecho, la biología ni siquiera ocupa el lugar central en su definición. Al mismo tiempo, se desmarca también de posiciones extremas como las de los deconstruccionistas radicales, para quienes "no existen enfermedades, sino prácticas". Rosenberg observa la existencia de enfermedades humanas, que corresponden a una determinada *frame* (o configuración, que diría yo, en lugar de la más directa traducción de "marco"). Esto quiere decir que, ante ciertos fenómenos vividos por los seres humanos como molestia o alteración, se construyen argumentos con los que se les define. Dicha argumentación cristaliza en una matriz de percepciones, donde actúan la cultura popular, los mundos de valores socialmente significativos, las peculiaridades de clase o género e, incluso, las conveniencias profesionales. La comprensión racional de cualquier fenómeno, tanto más cuanto más amenazador se presente, tenderá a proporcionarnos medios para dominarlo. En el caso de la enfermedad en el mundo avanzado de finales del siglo XX, es claro que los saberes médico-científicos son decisivos para cumplir dicho objetivo. La lucidez que nos permite la historia de la medicina es, precisamente, la de poder combinar ambas perspectivas.

En suma, un libro sumamente recomendable, del que sería una suerte que pudiéramos contar con la traducción española. (E. R. O.)

Observadores marinos

Celebración centenaria

THE BIOLOGICAL CENTURY (FRIDAY EVENING TALKS AT THE MARINE BIOLOGICAL LABORATORY). Dirigido por Robert Barlow, John Dowling y Gerald Weissmann. The Marine Biological Laboratory. Woods Hole, Massachusetts. (Con una introducción de Garland Allen.) Distribuido por Harvard University Press. Cambridge (Massachusetts) y Londres (Inglaterra), 1993.

En su sesión de verano de 1988, el conocido centro internacional de investigaciones interdisciplinares en biología conocido como MBL (Marine Biological Laboratory), sito en Woods Hole (Massachusetts), celebró su primer centenario. Con este motivo, especialistas de prestigio, y participantes en las tareas de investigación del MBL, pronunciaron una serie de conferencias conmemorativas que se han compilado en este volumen por tres de sus organizadores.

Cada conferencia está dedicada a varios pioneros del MBL que estaban hace un siglo en la frontera de las ciencias biológicas, en ese entorno privilegiado para la investigación que siempre ha sido el MBL.

El libro se inicia con una introducción del conocido profesional de la historia de la biología G. Allen. Este sitúa este ciclo de conferencias en contexto, comparándolo con otro ciclo que tuvo lugar hace cien años a raíz de la fundación del MBL. Entonces, por ejemplo, la teoría evolutiva en general, y la darwiniana en particular, eran protagonistas, como lo era la más que insistencia en una metodología reduccionista (en contraposición a la holista de, por ejemplo, H. Driesch), así como una profundización en temas de morfología. Hoy casi todos esos temas serían prácticamente conocimiento tácito, y sería destacable, en cambio y por ejemplo, la neurobiología.

Las once contribuciones que siguen se ajustan todas al mismo patrón. Primeramente, aparece una introducción histórica realizada por un miembro del MBL que se centra en el trabajo de los personajes homenajeados. Sigue una breve presentación del conferenciante que se completa, claro está, con la conferencia misma y que incluye una bibliografía afín a la cuestión que se desarrolla.

La conferencia de apertura trata de la metodología reduccionista en la ciencia de Jacques Loeb y en la obra literaria de Gertrude Stein, estudiante en la época del MBL. Sigue otra dedicada a la genética mendeliana (como contrapunto de la molecular), dictada por el premio Nobel Joshua Lederberg. La tercera se centra en problemas de diferenciación celular. A continuación se honra al gran bioquímico y polifacético premio Nobel Albert Szent-Györgyi. Las tres siguientes contribuciones se dedican a la dinámica de la permeabilidad de las membranas celulares, haciendo la última entrega énfasis en las neuronas. Los trabajos octavo y noveno se ocupan de la bioquímica y biofísica de la percepción visual, y se subraya especialmente la obra de los premios Nobel George Wald y Haldan K. Hartline, este último bajo la responsabilidad del conferenciante, y relativamente reciente asimismo premio Nobel (1981), Torsten Wiesel.

Los dos últimos ensayos son un poco capítulo aparte. Así, el décimo implica a las denominadas 3 W de la biología del comportamiento: las figuras homenajeadas, C. O. Whitman (primer director del MBL), el gran precursor del sociobiólogo E. O. Wilson que fue W. M. Wheeler, y, ya como conferenciante, el mismo Wilson. Este analiza la sociogénesis como fenómeno paralelo a la morfogénesis en lo que puede que sea la contribución más original de esta compilación. Por fin, la obra se cierra con el capítulo más extenso, donde se diserta sobre la ecología de los océanos (interacciones entre la física oceánica y las comunidades de seres vivos marinos), actividad que es la razón de ser del MBL como centro de investigación.

Lo que no refleja este volumen es una historia del MBL durante los cien años de su existencia, como tampoco encontramos aquí una crónica de la historia de la biología durante ese tiempo. Lo que sí se documenta es una perspectiva de investigaciones punteras entroncadas en tradiciones científicas ya hechas. La mezcla de historia y ciencia en estas páginas es siempre sugerente, aunque se dé un sesgo, por otra parte comprensible, hacia la biografía, y en la parte científica, hacia el esoterismo que excluye al no especialista.

Un índice onomástico y de materias, pero demasiado breve para ser útil, completa esta interesante edición. (C. C.)

Apuntes

La vida contemporánea es inimaginable sin los materiales plásticos, a pesar de lo cual su nivel de estima social es bastante bajo. A ello han venido a añadirse las objeciones que pueden hacerse desde el punto de vista ambientalista, tanto a su uso como a su fabricación. Este último aspecto podría quedar resuelto si alcanza la escala industrial un proceso de laboratorio mediante el que se ha conseguido la polimerización de metilmetacrilato sin disolventes, al tiempo que permite mayor control del peso molecular y de la composición del producto resultante.

Hace ya casi un decenio que John Cairns provocó una gran controversia en el mundo de la genética al defender que había mutaciones adaptativas, es decir, orientadas en un sentido preferente, frente a la aleatoriedad que les supone el dogma establecido por la teoría de la evolución. Nuevos datos experimentales apoyan la idea de que hay un mecanismo especial de mutación que funciona bajo situaciones selectivas determinadas. Se va conociendo incluso la forma detallada en que se produce: tipos especiales de recombinación.

Los modelos que se han ido tejiendo sobre el manto terrestre se centran en la transición de fase entre la porción superior y la inferior de éste en el patrón de convección. Se supone ahora que la pendiente de Clapeyron de la reacción cambia de negativa, a temperatura por debajo de los 2000 grados, a neutra y positiva por encima de ese valor, temperatura ésta que resultaría la propia en zonas de afloramiento mantélicas. En los modelos que acogen ese efecto, había plumas calientes que ascenderían sin dificultad a través de la región de transición de fase.

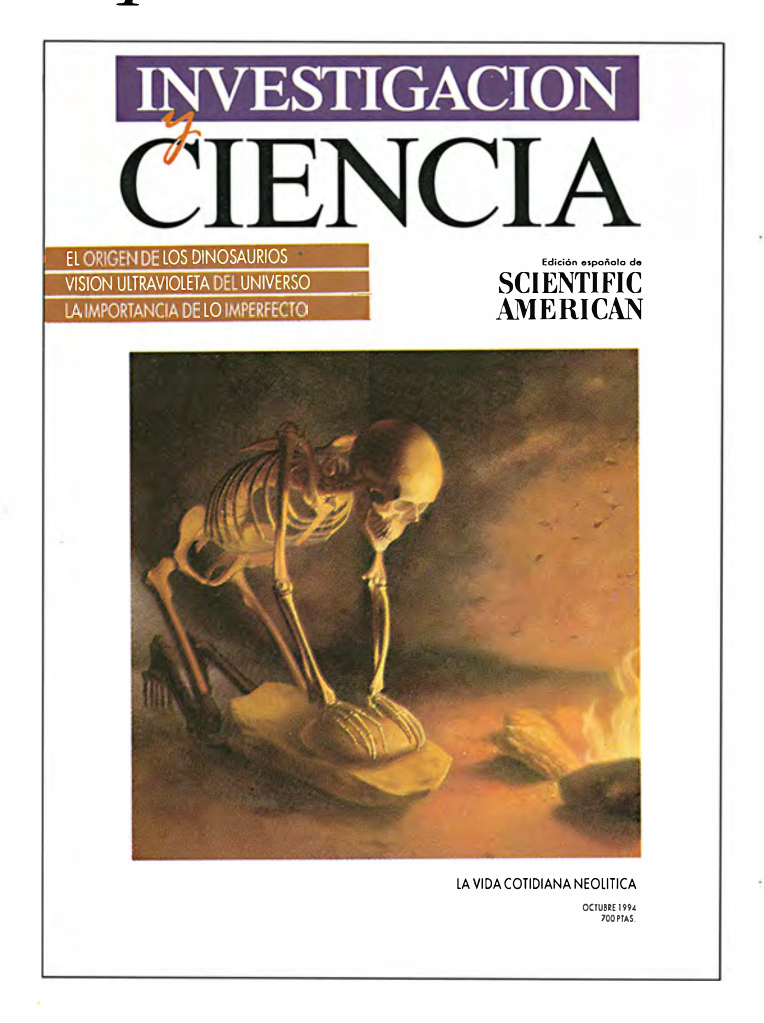
Las técnicas tradicionales de construcción de imágenes ópticas fracasan cuando el objeto a estudiar se halla incrustado en un medio dispersor de la luz. Dificultad que se ha vencido conjugando láseres ultrarrápidos y puertas ópticas, ardid que permite obviar los fotones dispersos y captar los de interés. Se ha comprobado con la construcción de imágenes de gotas translúcidas de soluciones dispersantes.

No hay tránsito más buscado en ciencia que el que se da de la conjetura a la observación. Mucho se había especulado sobre el origen y las propiedades de los granos de polvo que contienen las nubes de gas interestelares. El satélite *Explorador Ultravioleta Internacional* ha sorprendido la formación de polvo *in situ*. Lo detectó en la nova Casiopea. El gas procedente de la explosión de la nova absorbió fotones de alta energía en cuantía suficiente para enfriarlo hasta condensarlo en polvo.

La del rodeo es la estrategia más frecuente en investigación científica. Muchos fenómenos suelen resistirse, de entrada, a un análisis directo. El conocimiento de la magnitud del campo de radiación intergaláctico resolvería muchas cuestiones sobre la formación estelar en las galaxias. Pero no hay vía directa de separar, de la radiación galáctica, las emisiones extragalácticas. Aunque se puede llegar al fin deseado mediante un rodeo: inferir la radiación infrarroja a partir de los rayos gamma de altas energías observados.

Los colores siguen teniendo una importancia primerísima en astronomía. Así, el halo verduzco que rodea las estrellas en extinción promete llevarnos a una mejor comprensión de la creación de galaxias elípticas. En las galaxias, el rojo es signo distintivo de madurez; en las jóvenes, por contra, abundan las estrellas azuleñas. Nuestro universo está tachonado de galaxias rojas. Dos de ellas, justamente, acaban de provocar una nueva hipótesis: a tenor de su distancia, el cosmos debería tener, por lo bajo, 19.000 millones de años de antigüedad.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS SUBMARINOS DEL TERCER MUNDO, por Daniel J. Revelle y Lora Lumpe

La proliferación de los submarinos puede llegar a convertirse en una amenaza para las marinas tradicionales y poner en peligro la estabilidad regional, mientras que los fabricantes de armas la consideran una cuestión puramente comercial.

ASTRONOMIA EN EL ULTRAVIOLETA EXTREMO, por Stuart Bowyer

Las observaciones en estas longitudes de onda, antaño consideradas de realización imposible, están ampliando ahora nuestro conocimiento del cosmos.

EL TRATAMIENTO DE LOS ANTIGENOS POR LA CELULA, por Victor H. Engelhard

Las células alertan al sistema inmune de la presencia de infecciones desplegando complejos moleculares formados de fragmentos de sus propias proteínas y de las de los organismos invasores.

LOS SQUID, por John Clarke

Estas siglas nombran a los dispositivos superconductores de interferencia cuántica, los detectores de campos magnéticos más sensibles que hay. Sus aplicaciones van del diagnóstico de tumores cerebrales a la contrastación de la relatividad.

LOS ELOCUENTES HUESOS DE ABU HUREYRA, por Theya Molleson

Los esfuerzos cotidianos de una comunidad primitiva del cercano Oriente dejaron marcas reveladoras en los esqueletos de sus habitantes.

LA IMPORTANCIA DE SER IMPERFECTO, por P. Potier, J.-P. Bouchaud, J.-P. Delahaye, L. de Bonis y M. Gross

Una serie de artículos que examinan el papel jugado por la imperfección en física, en matemáticas, en ciencias naturales, en lingüística y en metalurgia. Las imperfecciones son muchas veces útiles y, en ocasiones, necesarias.

MICROSCOPIA CONFOCAL, por Jeff W. Lichtman

Esta técnica microscópica no tiene rival para la producción de imágenes nítidas, sean planas o tridimensionales, con luz ordinaria. También puede utilizarse para observar el interior de los tejidos de muestras vivas.

EL ORIGEN DE LOS DINOSAURIOS, por Fernando E. Novas

Los primitivos dinosaurios carnívoros incrementaron muy pronto su tamaño corporal y se multiplicaron, coevolucionando con corpulentos tetrápodos herbívoros de número muy superior.

